



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

# **DISEÑO Y PROPUESTA DE LOS AJUSTES DE PROTECCIONES DE UN GRUPO GENERADOR**

Autor: Javier Hervás Sienes

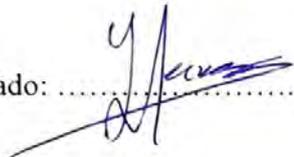
Directores: María Teresa Sánchez Carazo, Alberto Barrado Sánchez

Madrid

Junio 2015

Proyecto realizado por el alumno

**Javier Hervás Sienes**

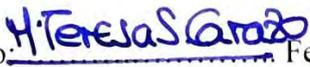
Firmado:  Fecha: 15 / 06 / 2015

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter confidencial

Los directores del proyecto

**María Teresa Sánchez Carazo**

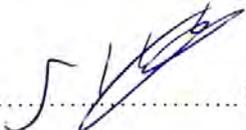
**Alberto Carlos Barrado Sánchez**

Firmado:  Fecha: 15 / 06 / 2015

Firmado: ..... Fecha: ...../...../.....

Visto Bueno del Coordinador de Proyectos

**Fernando de Cuadra García**

Firmado:  Fecha: 15 / 6 / 15

## ***Agradecimientos***

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia por haber sido mi principal fuente de motivación durante los cuatro años de ingeniería. Me han enseñado que los valores más importantes que debe tener un ingeniero son la perseverancia y la autoexigencia. Si hay alguien responsable de que haya llegado al final del camino, sin duda son ellos.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a mis dos directores de proyecto, Teresa y Alberto, por haberme permitido realizar este proyecto bajo su tutela, por el esfuerzo empleado y por el ofrecimiento sincero en ayudarme siempre que lo necesitaba.

Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a mis amigos más cercanos y a su incalculable apoyo durante todos estos años que, gracias su compañía, han pasado quizá demasiado rápido. Gracias por estar en los buenos y en los malos momentos siempre con una sonrisa.

Gracias a todos por acompañarme a lo largo de esta aventura, pues lo importante no sólo es llegar, sino disfrutar del camino.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

# **DISEÑO Y PROPUESTA DE LOS AJUSTES DE PROTECCIONES DE UN GRUPO GENERADOR**

Autor: Javier Hervás Sienes

Directores: María Teresa Sánchez Carazo, Alberto Barrado Sánchez

Madrid

Junio 2015



## ***Resumen del proyecto***

El presente proyecto estudia el ajuste de un sistema de protecciones para el generador de la central térmica de ciclo combinado de Tarragona construida por Endesa, actualmente perteneciente a E.O.N. Las protecciones eléctricas constituyen un sistema indispensable para todo tipo de instalación eléctrica, en el caso del presente proyecto, de un sistema de protecciones para un generador. Las protecciones de generadores deben considerar las condiciones de funcionamiento anormal en el generador, a diferencia de las protecciones de cualquier otro elemento de un sistema eléctrico. Los generadores representan los equipos con los costes más elevados en un sistema eléctrico y se encuentran sometidos, más que ningún otro equipo aparato de un sistema eléctrico, a innumerables condiciones dañinas y anormales. Es por esto que el ajuste del sistema de protecciones necesarias debe ser sensible, selectivo, rápido, fiable, robusto y autónomo.

Los principales defectos eléctricos que existen en cuanto al número de fases afectadas son: monofásicos, bifásicos y trifásicos. En cuanto al tipo de contacto, existen dos tipos: a tierra y entre fases. Los daños producidos por estos defectos son proporcionales a la energía de la falta, es decir, proporcionales al cuadrado de la intensidad por el tiempo. Por ello es vital que los equipos actúen rápidamente y con robustez. Existen cinco tipos de actuaciones para proteger al generador: las alarmas y señalizaciones, la apertura del interruptor de grupo (desconexión de red), la apertura del interruptor de campo (desexcitación), la parada mecánica del generador (rápida, normal o de emergencia) y las actuaciones contra incendios.

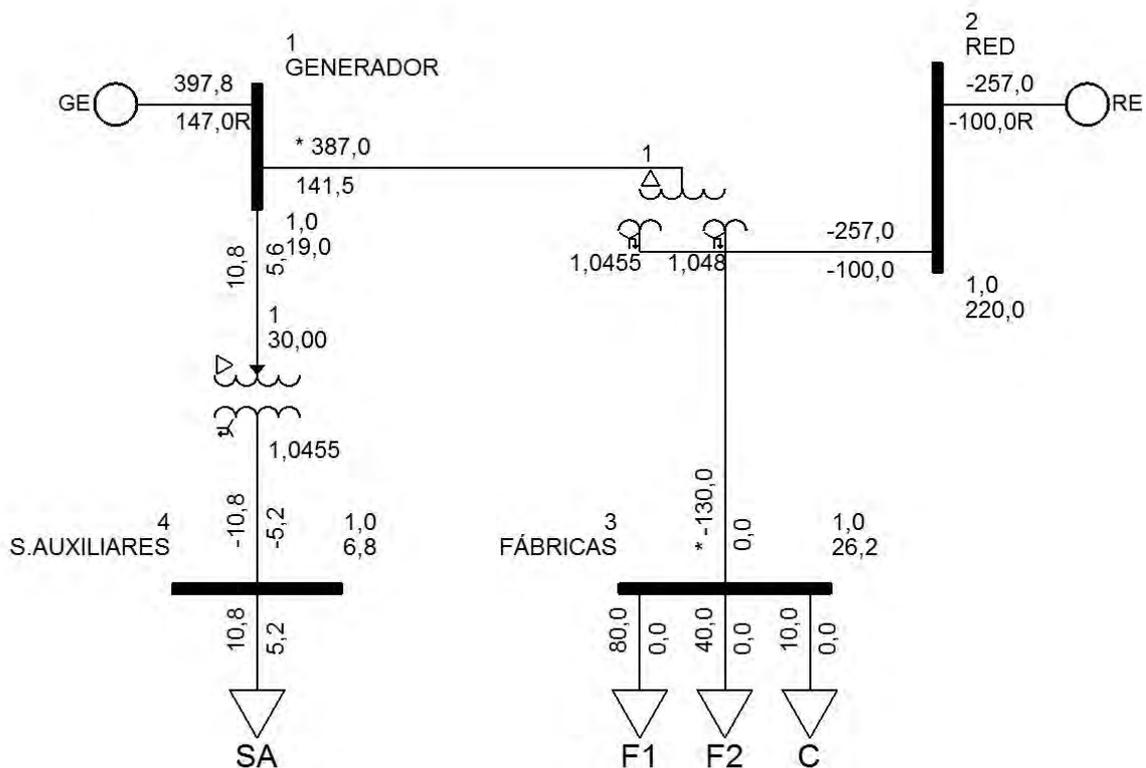
El grupo generador que se pretende proteger, está inmerso en un sistema eléctrico formador por:

- La red de potencia infinita de 220kV, corriente trifásica máxima 25kA, corriente monofásica máxima 28kA.
- El generador eléctrico de 468MVA, 19kV, 3000 rpm,  $X''d = 0,16$  p.u.
- Los servicios auxiliares. Divididos en 2 zonas: 6,6kV y 25kV.



- El transformador principal de 500 MVA de tres devanados, 230 / 26,2 / 19 kV, grupo de conexión YNyn0d1.
- El transformador auxiliar de 23 MVA, 19 / 6,6kV, grupo de conexión Dyn11.
- Los transformadores de medida.
- Los transformadores de puesta a tierra.
- Las protecciones del generador y el transformador principal.

Por medio del software PSS/E se llega a una simulación bastante precisa del sistema eléctrico de la central. En él se incluyen los 4 nudos principales y se pueden realizar simulaciones de flujos de carga y de faltas en cualquier zona. El esquema se muestra a continuación:



Al crear estos nudos (o buses) en el programa es necesario especificar algunas características para que la simulación sea correcta:

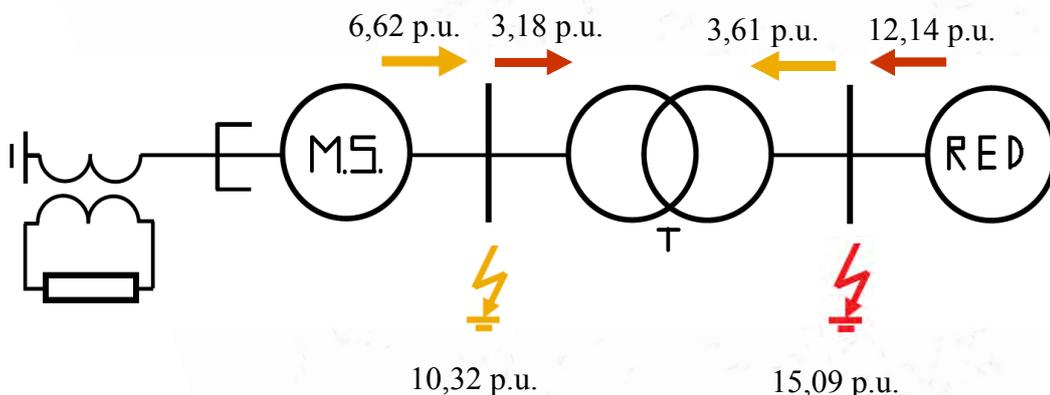
- Nudo 1 GENERADOR. Type code: 2 – Generator Bus.



- Nudo 2 RED. Type code: 3 – Swing Bus.
- Nudo 3 FÁBRICAS y nudo 4 S.AUXILIARES. Type code: 1 – Non-Gen Bus.

Lo siguiente es definir las funciones de protección necesarias para proteger el generador adecuadamente. Se deben instalar equipos de protección tanto en el generador (protecciones de faltas a tierra y entre fases, protecciones de sobrefuncionamiento y protecciones de funcionamiento anómalo), como en el transformador principal (protecciones propias y protecciones eléctricas). Entre las más importantes se encuentran: la protección a tierra en el estator (64G), en barras del generador (64B) y en el rotor (64R); la protección diferencial del generador (87G), de bloque (87TG) y del transformador (87T); la protección de sobreintensidad en el generador (51G) y en el transformador (50T y 51T); la protección de distancia (21); la protección de sobrecarga (49); la protección de secuencia inversa (46); la protección de pérdida de excitación (40); y muchas otras que se explican en esta memoria.

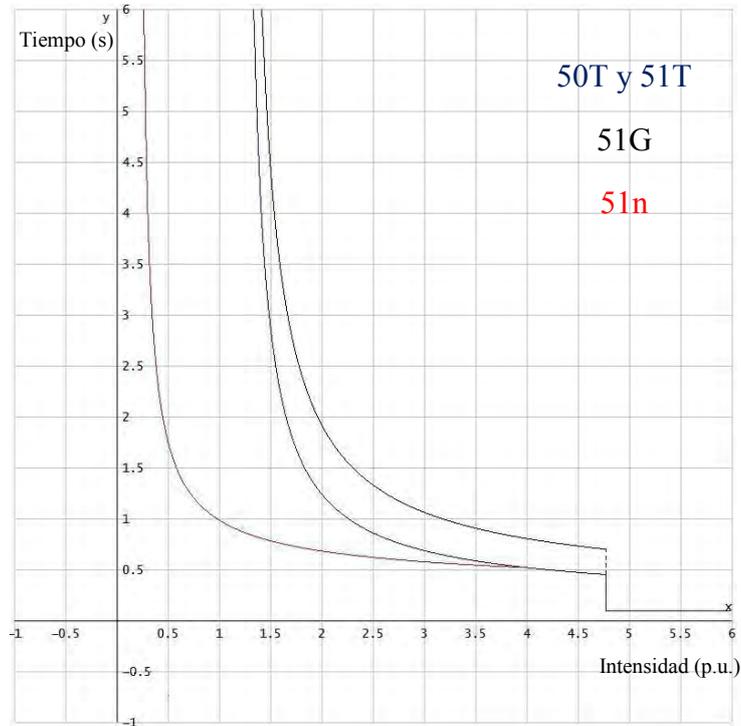
Una vez realizado el estudio de faltas, se obtiene que, el tipo de falta que produce unas corrientes de falta (y por tanto, unas aportaciones) mayores es la falta trifásica. Los nudos en los que se producen las mayores magnitudes son el nudo de la red y del generador. En la siguiente figura se resumen los aportes de una falta trifásica en zona red y en zona de generación:



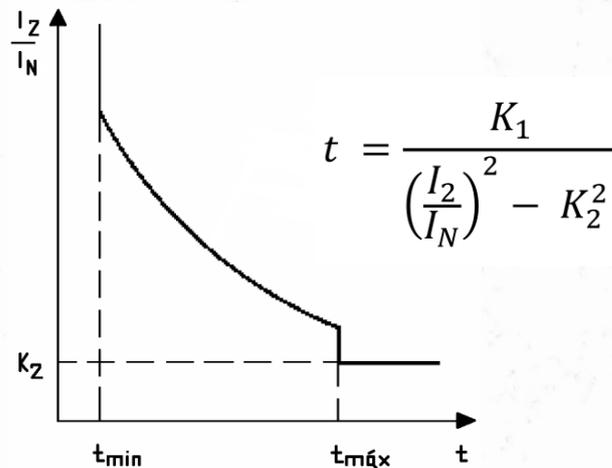
Finalmente se realiza el ajuste de las protecciones ante tres tipos de defectos:



- Coordinación ante sobrecorriente de neutro/fase: las principales protecciones implicadas son las de sobreintensidad del transformador y del generador (50T, 51T, 51G, 51n). El ajuste de las curvas de las protecciones es el siguiente:



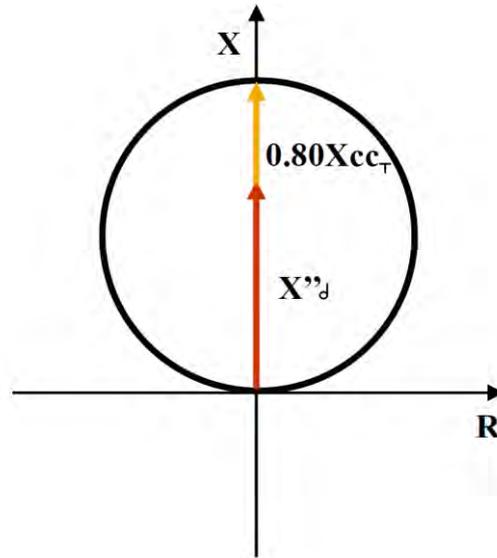
- Coordinación ante desequilibrio de fases: la principal protección es la de secuencia inversa (46G). El ajuste de la característica de la secuencia inversa mide la energía disipada en los devanados y es el que sigue:



Siendo  $T_{min} = 10$  segundos,  $T_{máx} = 30$  minutos y  $K_2 = 0,12$  p.u.



- Coordinación ante mínima impedancia: se ajusta la protección de distancia (21). El ajuste final seleccionado es el siguiente:





## ***Abstract***

This project studies the setting of an electrical protection system for the generator of the thermal plant in Tarragona. The plant was built by Endesa but currently it is owned by EON Electrical. Electrical protections are an indispensable system for all types of electrical facilities, in this case, generator protections. Generator protections must cope with abnormal operating conditions, unlike the protections of any other electrical system. Generators are the most expensive machines and they are subject to numerous harmful and abnormal conditions. This is why protections setting should be sensitive, selective, fast, reliable, robust and autonomous.

The main electrical defects considering the number of affected phases are single-phase, two-phase and three-phase defects. As for the type of contact, there are two types of defects, ground and phase defects. Damage caused by these defects are proportional to the power of the defect ( $I^2 * t$ ). It is vital for the protection system to act quickly. There are five types of actions to protect the generator; alarms and signals, to open the main generator breaker, to open the magnetic field breaker, mechanical stop and fire protections.

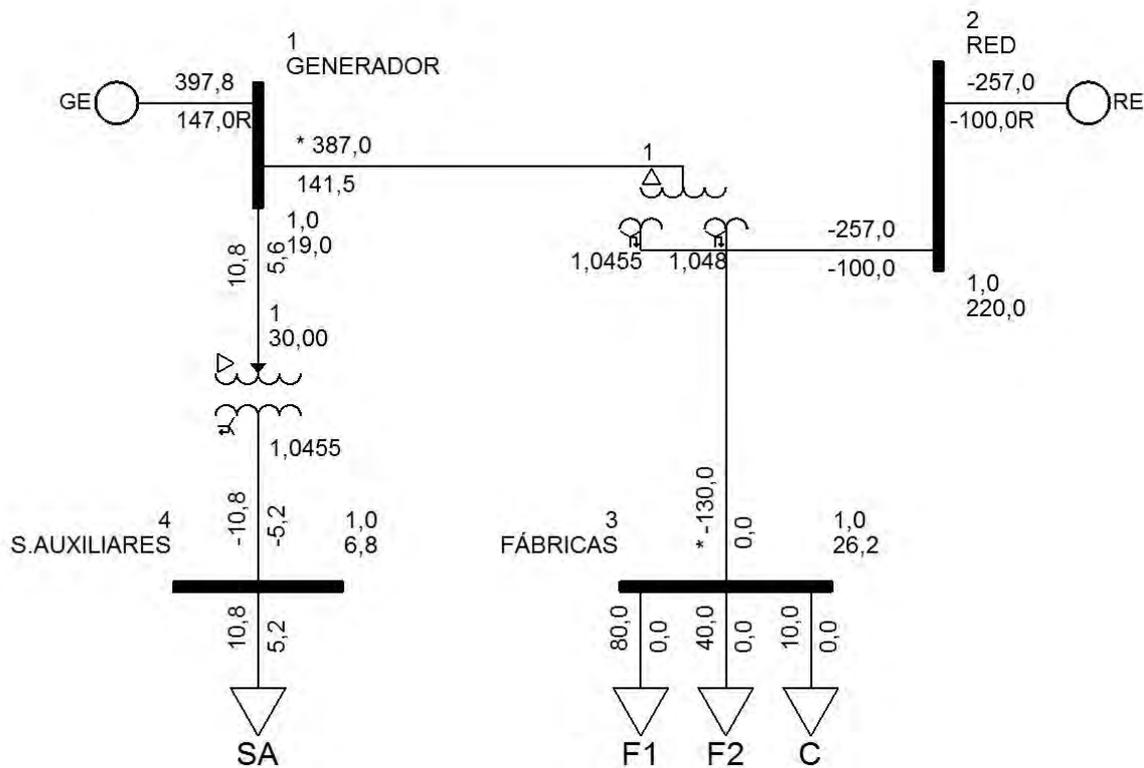
The Generator belongs to an electrical system that has the following parts:

- The 220kV mains electricity, 25kA maximum three-phase current, 28kA maximum single phase current.
- The 468MVA generator, 19kV, 3000 rpm,  $X''_d = 0,16$  p.u.
- The auxiliary equipment. They are divided in 2 areas: 6,6kV y 25kV.
- The 500 MVA main transformer, three windings, 230 / 26,2 / 19 kV, connection type YNyn0d1.
- The 23 MVA auxiliary transformer, 19 / 6,6kV, connection type Dyn11.
- The current transformers.
- The ground transformers.



- The generator and main transformer protections.

An accurate simulation of the plant can be reached by the PSS/E simulation software. The system has 4 main buses. Power flow and electrical faults simulations can be performed with the program. The electrical diagram is the following:



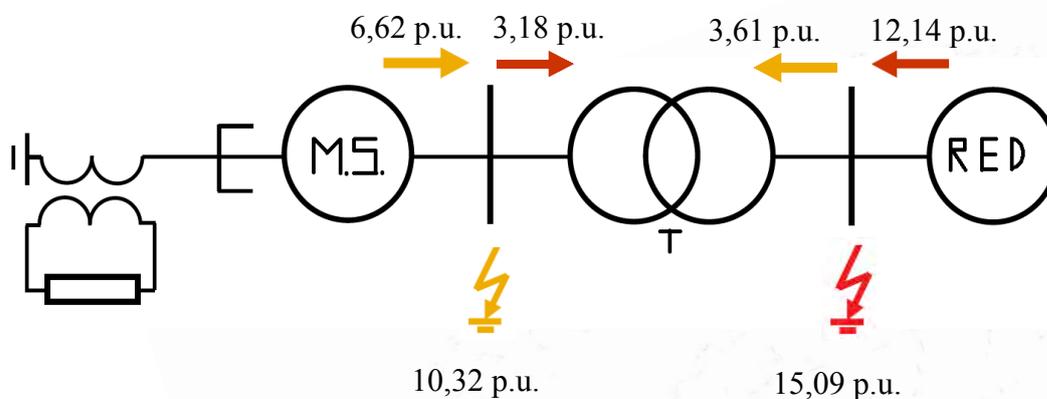
Some specifications must be set while creating these buses in order to develop a correct simulation.

- Bus 1 GENERADOR. Type code: 2 – Generator Bus.
- Bus 2 RED. Type code: 3 – Swing Bus.
- Bus 3 FÁBRICAS and bus 4 S.AUXILIARES. Type code: 1 – Non-Gen Bus.



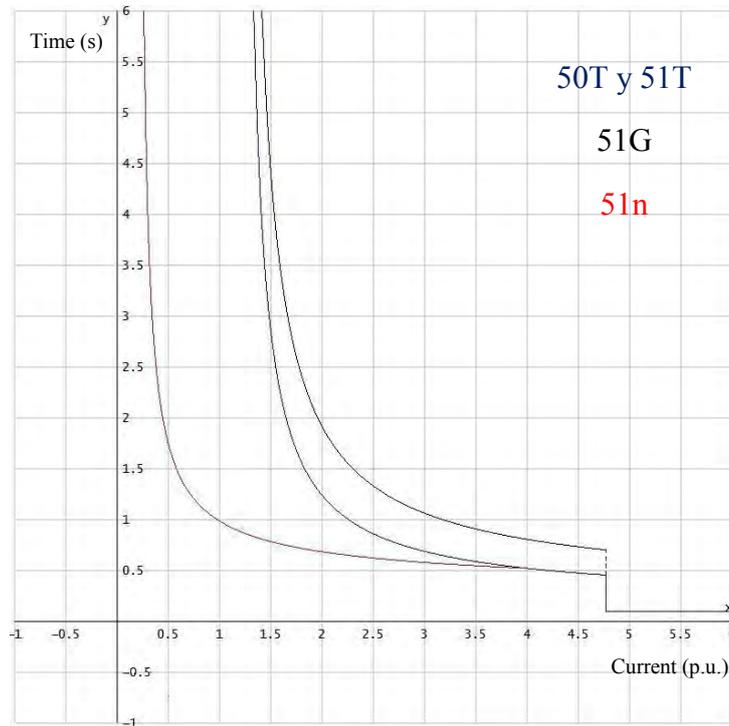
The next thing is to define the needed protection functions for the Generator. Protections must be installed in the generator (ground and phase protections, overheating protections and anomaly working protections), in the main transformer (own protections and electrical protections). The most important protections are: the ground stator protection (64G), the ground generator terminals protection (64B), the ground rotor protection (64R), the generator differential protection (87G), the group differential protection (87TG), the transformer differential protection (87T), the generator overcurrent protection (51G), the transformer overcurrent protection (50T and 51T), the distance protection (21), the overload protection (49), the negative sequence protection (46), the loss of excitation protection (40); and many others which are explained in this essay.

Once the electrical fault study is done, some conclusions are acquired. The most harmful type of defect is the three-phase fault. The generator and the mains electricity buses are the most affected by the three-phase fault. The next picture gathers the effects of a three-phase fault on the generator bus and on the mains electricity bus:

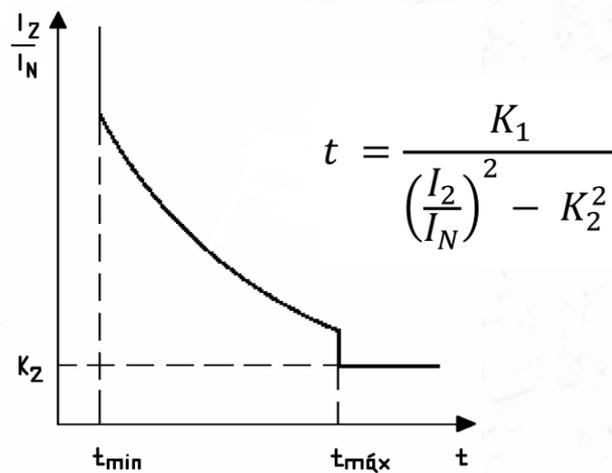


And finally, the protections are set for three type of electrical defects

- Coordination for neutral/phase overcurrent: the main protections involved are the generator and transformer overcurrent protections (50T, 51T, 51G, 51n). The adjustment of the protections is as follows:

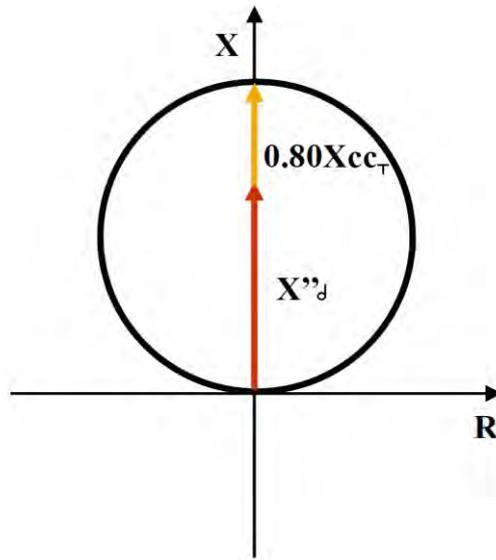


- Coordination for unbalanced phases: the main protection involved is the reverse sequence protection (46G). The adjustment of the protection measures the dissipated energy in the windings:



Siendo  $T_{min} = 10$  segundos,  $T_{max} = 30$  minutos y  $K_2 = 0,12$  p.u.

- Coordination for minimum impedance: the distance protection (21) is set in the following picture:





## Índice de la memoria

<b>Parte I Memoria .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1 Introducción.....</b>	<b>2</b>
1.1 Estudio de las tecnologías existentes.....	2
1.2 Motivación del proyecto .....	3
1.3 Objetivos del proyecto.....	4
1.4 Metodología / Solución desarrollada.....	6
1.5 Recursos / Herramientas empleadas .....	7
<b>Capítulo 2 Estado del arte.....</b>	<b>9</b>
2.1 Introducción a las protecciones.....	9
2.1.1 Relés según el tiempo de actuación.....	11
2.1.2 Relés según la magnitud de medida .....	13
2.2 Tipos de defectos.....	18
2.3 Actuación de las protecciones del generador.....	20
2.3.1 Alarma y señalización.....	20
2.3.2 Disparo del interruptor de grupo o desconexión de red .....	20
2.3.3 Disparo del interruptor de campo o desexcitación.....	21
2.3.4 Parada mecánica .....	21
2.3.5 Actuación contra incendios.....	22
<b>Capítulo 3 Caracterización de la problemática.....</b>	<b>23</b>
3.1 Descripción del sistema y del grupo generador .....	23
3.2 Implementación del sistema en el software PSS/E.....	28
<b>Capítulo 4 Determinación de las funciones de protección necesarias .....</b>	<b>31</b>
4.1 Equipos de protección para el generador.....	31
4.1.1 Protecciones de faltas a tierra y entre fases.....	32



---

4.1.2 Protecciones de sobrefuncionamiento del generador .....	40
4.1.3 Protecciones de funcionamiento anómalo del generador .....	44
<b>4.2 Equipos de protección del transformador principal.....</b>	<b>47</b>
4.2.1 Protecciones propias del transformador principal .....	47
4.2.2 Protecciones eléctricas del transformador principal .....	48
<b>Capítulo 5 Estudio de faltas.....</b>	<b>51</b>
5.1 Faltas en el nudo red .....	51
5.2 Faltas en el nudo grupo generador .....	53
5.3 Faltas en los servicios auxiliares .....	55
<b>Capítulo 6 Coordinación de las protecciones.....</b>	<b>60</b>
6.1 Coordinación ante sobrecorriente de neutro/fase .....	60
6.2 Coordinación ante desequilibrio de fases .....	65
6.3 Coordinación ante mínima impedancia .....	66
<b>Capítulo 7 Conclusiones .....</b>	<b>68</b>
<b>Capítulo 8 Bibliografía .....</b>	<b>70</b>
<b>Parte II Planos .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1 Planos de la C.T.C.C de Tarragona.....</b>	<b>2</b>
<b>Parte III Presupuesto del proyecto.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1 Sistemas de protección compuestos.....</b>	<b>2</b>
<b>Capítulo 2 Aparamenta.....</b>	<b>4</b>



## Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Distribución de fallos por sistemas de los turbogeneradores .....</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 2. Diagrama de flujo de la metodología empleada en el diseño del sistema de protecciones .....</i>	<i>7</i>
<i>Ilustración 3. Característica instantánea .....</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 4. Característica de tiempo definido o independiente .....</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 5. Característica de tiempo inverso o dependiente.....</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 6. Familia de curvas de característica de tiempo inverso o dependiente .....</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 7. Características combinadas en curvas de disparo .....</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 8. Funcionamiento de la protección de sobreintensidad direccional.....</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 9. Resumen curvas características de la protección de distancia .....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 10. Esquema y característica de la protección diferencial.....</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 11. C.T.C.C. Tarragona, zona Red 220kV.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 12. C.T.C.C. Tarragona, zona Generador .....</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 13. C.T.C.C. Tarragona, transformador principal.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 14. C.T.C.C. Tarragona, transformador auxiliar .....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 15. C.T.C.C. Tarragona, transformador de puesta a tierra del generador .....</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 16. Diagrama del sistema eléctrico equivalente de la C.T.C.C de Tarragona en PSS/E.....</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 17. Curvas indicadoras de los daños en el generador.....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 18. Tensión en las fases sanas en caso de falta a tierra .....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 19. Puesta a tierra del neutro del generador.....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 20. Relé de máxima intensidad de neutro de la 64G .....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 21. Relé de máxima tensión de neutro de la 64G .....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 22. Relé diferencial homopolar de la 64G.....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 23. Esquema de protecciones contra defectos a tierra del estator.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 24. Relé de corriente alterna de la 64G .....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 25. Relé de corriente continua de la 64G.....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 26. Relé de medida de capacidad de la 64R .....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 27. Esquema de la protección diferencial de bloque. ....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 28. Disposición de la protección de sobreintensidad 51G.....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 29. Disposición y característica de la protección de distancia .....</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 30. Sonda de temperatura de la 49 .....</i>	<i>41</i>



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
INGENIERO INDUSTRIAL

*ÍNDICE DE ILUSTRACIONES*

---

<i>Ilustración 31. Característica de la protección contra sobrecarga del estator.....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 32. Ajuste de la protección de secuencia inversa.....</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 33. Ajuste de la protección de sobretensión .....</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 34. Relé de mínima corriente de excitación .....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 35. Característica del relé de mínima impedancia reactiva.....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 36. Curva potencia-ángulo de carga de un generador síncrono.....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 37. Curvas de las protecciones de potencia inversa y de mínima potencia .....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 38. Esquema de la protección de tierra restringida.....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 39. Instalación de la protección de cuba.....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 40. Ajuste de la curva de protección de sobreintensidad del transformador .....</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 41. Ajuste de las curvas de protección de sobreintensidad del transformador y del generador .....</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 42. Ajuste de las curvas de protección 50T, 51T, 51G y 51n .....</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 43. Ajuste de la característica de la protección de secuencia inversa .....</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 44. Ajuste de la primera zona de la protección de mínima impedancia .....</i>	<i>67</i>



## Índice de tablas

Tabla 1. Resumen flujo de carga del sistema .....	30
Tabla 2. Resumen de faltas en el nudo 2, Red .....	52
Tabla 3. Aportes a falta trifásica en la red .....	52
Tabla 4. Aportes a falta monofásica a tierra en la red .....	52
Tabla 5. Aportes a falta bifásica a tierra en la red .....	53
Tabla 6. Aportes a falta bifásica en la red .....	53
Tabla 7. Resumen de faltas en el nudo 1, Generador .....	54
Tabla 8. Aportes a falta trifásica en el generador .....	54
Tabla 9. Aportes a falta monofásica a tierra en el generador .....	55
Tabla 10. Aportes a falta bifásica a tierra en el generador .....	55
Tabla 11. Aportes a falta bifásica en el generador .....	55
Tabla 12. Resumen de faltas en el nudo 3, Fábricas y calderas .....	56
Tabla 13. Aportes a falta trifásica en las fábricas y calderas .....	56
Tabla 14. Aportes a falta monofásica a tierra en las fábricas y calderas .....	57
Tabla 15. Aportes a falta bifásica a tierra en las fábricas y calderas .....	57
Tabla 16. Aportes a falta bifásica en las fábricas y calderas .....	57
Tabla 17. Resumen de faltas en el nudo 4, Servicios auxiliares de la central .....	58
Tabla 18. Aportes a falta trifásica en los servicios auxiliares de la central .....	58
Tabla 19. Aportes a falta monofásica a tierra en los servicios auxiliares de la central .....	59
Tabla 20. Aportes a falta bifásica a tierra en los servicios auxiliares de la central .....	59
Tabla 21. Aportes a falta bifásica en los servicios auxiliares de la central .....	59



# *Parte I MEMORIA*



## Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

El presente Proyecto aborda el proceso de diseño de los ajustes de las protecciones eléctricas y la coordinación entre ellas para proteger adecuadamente un grupo generador de la Central Térmica de Ciclo Combinado de Tarragona. En este primer capítulo se resume una introducción de este proyecto.

En la primera sección se expone el estado de la cuestión que se va a abordar en este proyecto, en ella se describen las diferentes soluciones disponibles actualmente en el campo de las protecciones de generadores. Posteriormente, en la segunda sección, se explican las razones que motivan la realización del diseño del ajuste de protecciones de un grupo generador. Seguidamente, en la tercera y cuarta sección, se tratan los objetivos y la metodología seguida en el Proyecto. Es decir, ¿Qué es lo que se va a hacer? Y, ¿Cuál es el camino a seguir para conseguir los objetivos? Finalmente, se explicarán los recursos y las herramientas empleadas para la realización del trabajo.

### ***1.1 ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS EXISTENTES***

---

La calidad de servicio en el suministro eléctrico viene configurada por el número de interrupciones del mismo y por las fluctuaciones de tensión y frecuencia dentro de los límites fijados en el sistema eléctrico. Sin embargo, incluso los sistemas mejor diseñados y conservados están expuestos a posibles averías. Es por esto que estas incidencias deben ser eliminadas con el objetivo de minimizar los posibles daños a la instalación. Esto se consigue por medio de equipos de protección. En el **Capítulo 2** de esta memoria se recoge el estado del arte de los sistemas de protección.



---

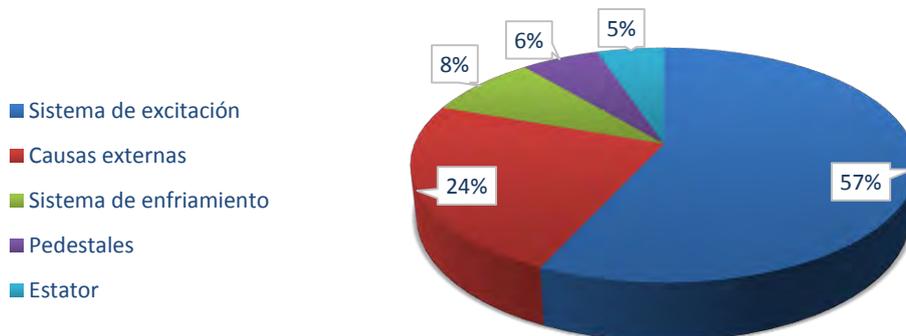
## 1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

---

En todos los mercados eléctricos que existen en la actualidad es posible diferenciar claramente las distintas partes que los conforman. La generación es la fase inicial del proceso del transporte energético y es donde se produce la energía eléctrica necesaria para abastecer la demanda del mercado. En este tipo de mercados la regularidad en el servicio se ha vuelto prácticamente imprescindible para el cliente y muy recomendable, económicamente hablando, para los operadores de dichos mercados. Ante una incidencia que inhabilite la generación en una central (bien sea debido a un fallo en el sistema eléctrico de la misma o en sus inmediaciones), el operador de la red eléctrica se encuentra con dos problemas principales:

- La regulación del sistema eléctrico debe ser capaz de suplir la pérdida de la central aumentando la potencia eléctrica generada en nudos próximos a donde se ha producido el fallo. De lo contrario, la tensión y la frecuencia de la red en dichos nudos podrían fluctuar más allá de los límites de la seguridad dando lugar a más caídas en nudos de generación, avería de equipos o incluso apagones eléctricos en cadena.
- Si la incidencia causante del fallo de generación (ya sea un cortocircuito, una sobrecarga, etc.) no se soluciona a tiempo, puede ocasionar graves problemas en la central:
  - Costes económicos elevados derivados de la pérdida parcial o total de equipos: generadores eléctricos, transformadores, equipos auxiliares, entre otros.
  - Parada de la central por tiempo indefinido con las consecuentes pérdidas económicas por mantenimientos, reparaciones o personal inactivo.

A continuación, en la **Ilustración 1**, se puede apreciar un gráfico en el que se muestra la distribución de fallos en grupos generadores de potencia similar al que se va a estudiar en el presente proyecto:



*Ilustración 1. Distribución de fallos por sistemas de los turbogeneradores*

De media, el número total de fallos cada seis años en este tipo de generadores es de 118, y, tal y como muestra el gráfico anterior, la mayoría de estos incidentes son de naturaleza eléctrica (los más agresivos con la integridad y el servicio de los equipos): sistema de excitación, causas externas (pueden ser faltas en la red, el transformador o equipos auxiliares) y faltas en el estator.

Queda claro, por tanto, que la necesidad de evitar este tipo de incidencias o al menos minimizar los daños que pueden llegar a ocasionar, es una de las mayores prioridades de los operadores de la red eléctrica. La forma de preservar la integridad de los equipos de generación de una central es mediante el uso de las protecciones eléctricas que se adecúan a las funciones de protección que requiere cada equipo.

### **1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El objetivo de este Proyecto Fin de Grado es el diseño de los ajustes de protecciones de un grupo generador. La propuesta final debe ser un modelo capaz de proteger los equipos de la central de generación ante los diversos tipos de faltas o defectos, además de ser un modelo en el que la coordinación entre los distintos tipos de protecciones sea la adecuada para que



---

actúen de forma sincronizada unas con otras. Por tanto, el objetivo de este proyecto será encontrar el sistema de protecciones que cumpla con las especificaciones mencionadas. Para ello, este sistema debe tener las siguientes características:

- **Sensibilidad:** se define como la capacidad de detectar pequeñas variaciones en la magnitud que vigila una protección.
- **Selectividad:** es la capacidad de discriminar cuando se debe actuar, esperar o bloquearse, en función de la localización y el tipo de falta. De esta forma se evita la pérdida de servicio en partes más críticas del sistema.
- **Rapidez:** consiste en actuar en el menor tiempo posible para minimizar los daños en el equipo o en la instalación producidos por la falta. Se debe tener en cuenta que aumentar la rapidez del sistema de protecciones implica un aumento en el precio de los equipos de protección y una disminución de la fiabilidad si las protecciones son demasiado rápidas.
- **Fiabilidad:** es la probabilidad de un correcto funcionamiento de la protección. Para que un sistema de protecciones sea fiable, debe cumplir los siguientes requisitos:
  - Debe ser seguro, es decir, que no actúe cuando no debe hacerlo; bien sea porque el defecto no existe, no se cumplen las condiciones mínimas para la actuación o porque desaparece antes de un tiempo mínimo determinado
  - Deber ser obediente, esto es, que el sistema de protecciones actúe cuando debe hacerlo.
- **Robustez:** un sistema de protección robusto es el que es capaz de soportar permanentemente las condiciones ambientales y de trabajo (el aislamiento de las protecciones debe ser el adecuado, el poder de corte y el poder de cierre ante un defecto debe ser el suficiente para despejarlo en un tiempo mínimo que garantice la seguridad del sistema, etc.).

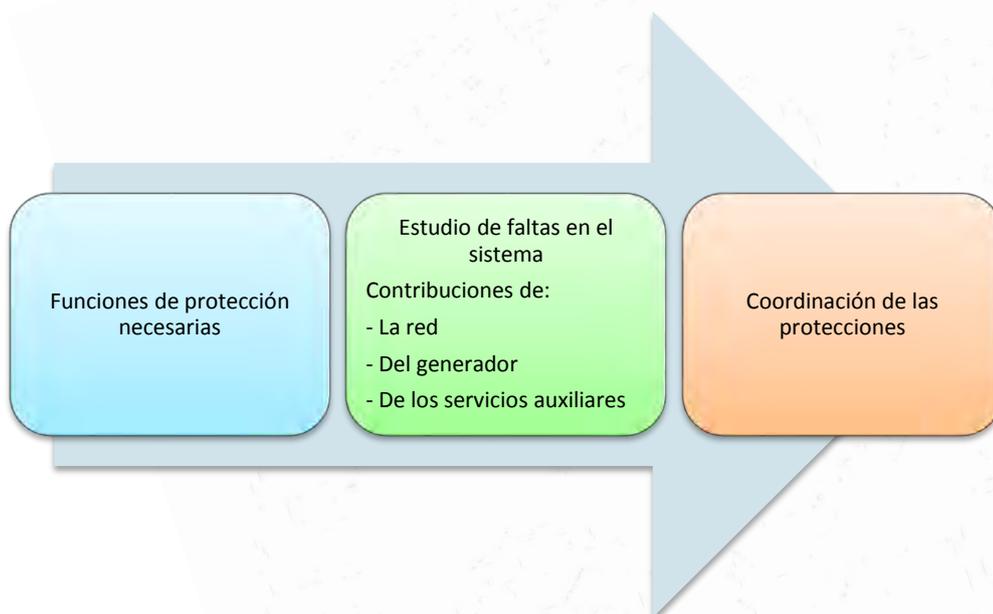


- **Autonomía:** el sistema de protecciones debe ser autónomo del resto de elementos de la instalación, ya que su disponibilidad no puede verse condicionada por averías externas al mismo.

## 1.4 METODOLOGÍA / SOLUCIÓN DESARROLLADA

El proceso de diseño comienza con el estudio de las tecnologías existentes en el campo de las protecciones de equipos de generación: cuáles son los componentes principales de un sistema de protecciones y cómo funcionan, conocer los principales tipos de protecciones eléctricas, cómo y cuándo actúan y de qué forma se coordinan entre sí.

Finalizado el estudio del arte, a continuación, se procede a confeccionar el diseño propuesto. En la **Ilustración 2**, se plantea un diagrama de flujo que contiene los principales pasos que se llevan a cabo para la elaboración de la propuesta del diseño del conjunto de protecciones que se presenta en esta memoria:





---

*Ilustración 2. Diagrama de flujo de la metodología empleada en el diseño del sistema de protecciones*

Una vez seguidos los pasos necesarios, que se recogen en la ilustración anterior, se propone un diseño final que abarca las funciones de protección necesarias para asegurar la integridad del grupo generador, se añaden unas conclusiones finales y se proponen posibles mejoras a los sistemas de protecciones que existen actualmente. Además, se incluye un apartado de bibliografía en el que se recogen todas las referencias que se realizan a libros, publicaciones y páginas web a lo largo de la memoria.

Para terminar, en este informe se recoge un estudio económico que revisa la viabilidad de la realización de este proyecto y se completa con el aporte de un presupuesto del mismo para llevarlo a cabo.

## ***1.5 RECURSOS/HERRAMIENTAS EMPLEADAS***

---

Para la realización del proyecto se recurre a una aplicación de software llamada “**Power System Simulator for Engineering**” (PSS/E) de la empresa alemana Siemens. Es un software que se utiliza como analizador de redes de transmisión eléctrica, mediante su uso se pueden llevar a cabo desde análisis, simulaciones y optimizaciones de sistemas de potencia hasta el estudio y la simulación de los diversos defectos que pueden ocurrir en un sistema eléctrico. Desde su introducción se ha convertido en el programa más utilizado de su tipo.

Otro tipo de recursos y aplicaciones informáticas que se utilizan son:

- **MATLAB:** Paquete matemático utilizado para el cálculo complejo de curvas características de protecciones.



- **Derive 6:** Paquete matemático utilizado para el cálculo complejo de curvas características de protecciones.
- **Microsoft Word 2013:** Procesador de textos del paquete de Office 2013 utilizado para la redacción y elaboración de este documento.
- **Microsoft PowerPoint 2013:** Programa de elaboración de presentaciones del paquete de Office 2013 utilizado para la creación de gráficos y esquemas.
- **Microsoft Excel 2013:** Programa de elaboración de hojas de cálculo del paquete de Office 2013 utilizado para la creación de tablas y gráficos.



## **Capítulo 2 ESTADO DEL ARTE**

En este capítulo se realizará un estudio acerca del estado de la cuestión de los sistemas de protecciones mediante una breve introducción a las nociones básicas de las protecciones eléctricas, un estudio de los diferentes tipos de defectos que pueden ocurrir en un sistema eléctrico y los consecuentes daños que pueden ocasionar.

Una vez realizado el estudio general del panorama de las protecciones y los tipos de defectos, se ahondará en cómo se clasifican las protecciones de un generador, cómo actúa cada una y en qué condiciones lo hace.

### ***2.1 INTRODUCCIÓN A LAS PROTECCIONES***

---

La misión principal de los equipos de un sistema de protecciones eléctricas consiste en seguir de forma efectiva y ordenada los siguientes pasos:

1. Identificar y localizar defectos o anomalías en cuanto al tipo de falta y el lugar en el que se ha producido.
2. Realizar de forma automática las actuaciones y desconexiones necesarias para despejar el defecto en el menor tiempo posible y dejando fuera de servicio la menor parte posible del sistema.
3. Señalizar el defecto detectado e indicar las actuaciones realizadas de cara a un futuro análisis de la incidencia.



Existen diversos componentes de los sistemas de protección que, combinados, son capaces de cumplir los pasos previamente descritos. Dichos componentes son los que siguen a continuación:

- **Transformadores de medida:** aíslan los circuitos de medida permitiendo una mayor facilidad a la hora de introducir instrumentos de medición y relés. Los hay de dos clases: de intensidad y de tensión.
  
- **Relés:** son unidades que permiten abrir o cerrar otros circuitos independientes al de medida mediante contactos. Los hay de distintos tipos:
  - Relés de protección: detectan alteraciones de las condiciones normales de los equipos que protegen, realizando disparos y activando alarmas.
  - Relés de supervisión: verifican las condiciones del sistema en funcionamiento normal.
  - Relés de ángulo: detectan desfases entre magnitudes eléctricas. Son especialmente importantes en protecciones direccionales.
  - Relés de regulación: se activan cuando una variable supera un rango previsto y operan sobre equipos auxiliares para devolver el valor de la variable a su valor normalizado.
  - Relés auxiliares: multiplican señales de los relés principales y activan equipos.
  
- **Unidades de disparo:** son las encargadas de transformar las órdenes de los relés en actuaciones sobre el circuito por medio de los contactos del relé.
  
- **Baterías de alimentación:** proporcionan la alimentación que requieren las protecciones para su funcionamiento de forma independiente a la red. Deben proporcionar la autonomía suficiente como para garantizar la actuación de las protecciones ante cualquier tipo de defecto.

Los relés son la parte ejecutora del sistema de protecciones y, por tanto, la más importante de los sistemas de protecciones. Por esto, a continuación, se explica una clasificación detallada acerca de cómo se clasifican los relés en función de diversos parámetros de protección:

### 2.1.1 Relés según el tiempo de actuación

- **Relé instantáneo:** aquel cuyo tiempo de operación es lo más rápido posible, teniendo en cuenta las limitaciones físicas de relé.

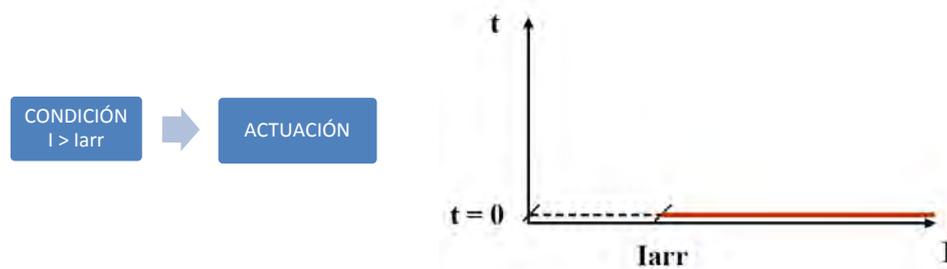


Ilustración 3. Característica instantánea

- **Relé temporizado:** una vez que el relé cumple sus condiciones de arranque, tiene un retardo añadido antes de realizar la actuación. Hay dos tipos de relés temporizados:
  - De tiempo definido o independiente: el retardo es un tiempo fijo e independiente del valor de entrada de la magnitud que se está vigilando.

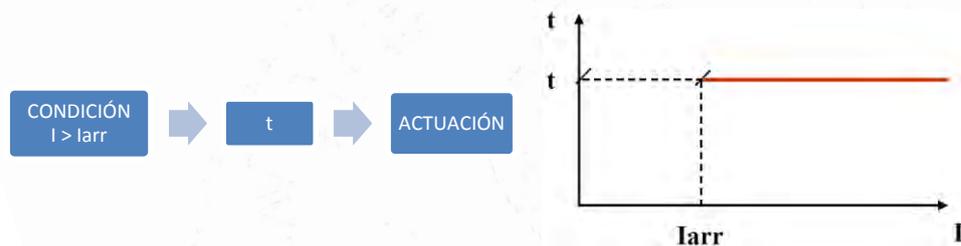
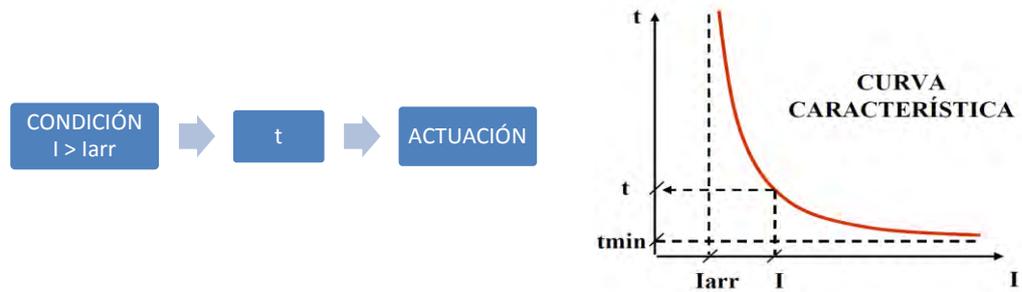


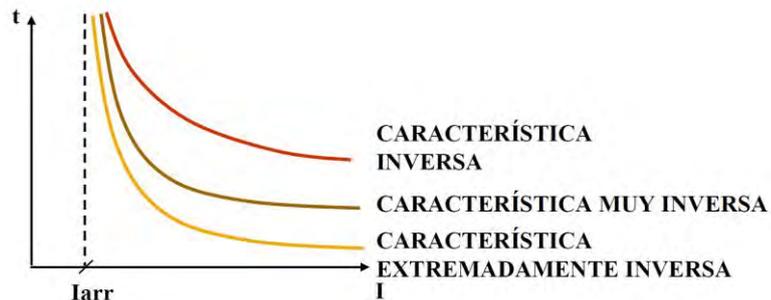
Ilustración 4. Característica de tiempo definido o independiente

- De tiempo inverso o dependiente: el retardo es un tiempo que es inversamente proporcional al valor de entrada de la magnitud que se está vigilando. Este retardo queda determinado en las curvas características de la protección.



*Ilustración 5. Característica de tiempo inverso o dependiente*

Existen varias familias de curvas, las más rápidas tienen un menor tiempo de actuación para igual valor de la magnitud vigilada:



*Ilustración 6. Familia de curvas de característica de tiempo inverso o dependiente*

La expresión analítica de las curvas características normalizadas es la siguiente:

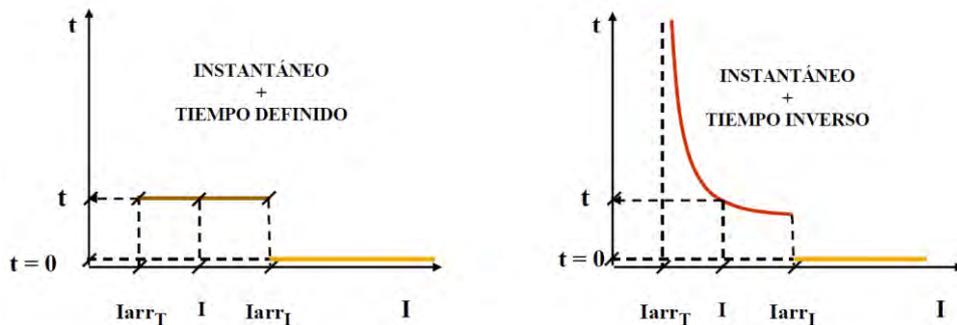
$$t = \frac{a * T}{\left(\frac{I_p}{I_a}\right)^b - 1}$$

Siendo:

- $I_a$  la corriente de arranque.
- $I_p$  la corriente de paso

- $T$  el dial.
- $a$  y  $b$  los parámetros que dependen del tipo de característica.

Cabe destacar que un relé puede tener distintas características combinadas en su curva de actuación, tal y como se muestra en la **Ilustración 7**. De esta forma se puede adecuar a las necesidades particulares de cada instalación.



*Ilustración 7. Características combinadas en curvas de disparo*

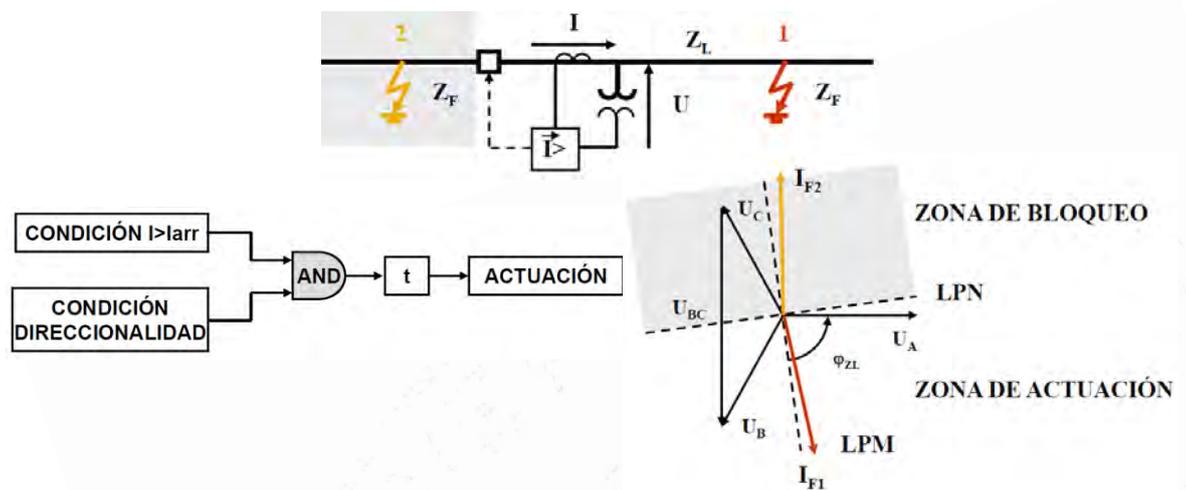
### 2.1.2 Relés según la magnitud de medida

- **Relé de sobreintensidad:** su objetivo es detectar cualquier elevación anormal de la intensidad en la parte del circuito que se desea proteger. Actúa cuando se superan los límites máximos de intensidad, bien sea debido a un cortocircuito o una sobrecarga. Este tipo de relés también se pueden clasificar en instantáneos y temporizados (50 → tiempo definido, 51 → tiempo inverso) según se ha explicado en el apartado anterior.

La mayoría de los relés de sobreintensidad incorporan una unidad de disparo instantánea en serie con este relé (tanto los de tiempo definido como inverso). Esta unidad se ajusta a un valor muy superior al de la intensidad de arranque del relé para evitar que se produzca un tiempo de actuación excesivo en caso de una falta de gran magnitud, tal y cómo se puede ver en la **Ilustración 7**.

- **Relé direccional:** actúa como un relé de sobreintensidad pero con la diferencia de hacerlo cuando la intensidad forma un ángulo determinado en relación a una magnitud de referencia (normalmente la tensión). El criterio de actuación depende de la magnitud de la intensidad y del ángulo formado por el vector de intensidad con la magnitud de referencia o polarización.

La magnitud más crítica para un relé direccional es la del ángulo formado por la intensidad de falta con la magnitud de referencia, es por esto que la protección direccional es más selectiva que la de sobreintensidad. En caso de falta en cualquier tramo de una red mallada hay aportaciones de corriente de los tramos vecinos. Al añadir la condición de direccionalidad, únicamente actuará el interruptor por el que el sentido de la intensidad de falta sea el que se ha previsto evitar siempre y cuando el valor de la intensidad de falta sea lo suficientemente grande. En la siguiente ilustración se muestra el funcionamiento de la protección de sobreintensidad direccional:



*Ilustración 8. Funcionamiento de la protección de sobreintensidad direccional*

El ángulo  $\varphi_{ZL}$  es el ángulo de máximo par calculado a partir de la impedancia equivalente del esquema en avería. Este ángulo define:

- La línea de par máximo (LPM).
- La línea de par nulo (LPN).
- Los semiplanos de zona de actuación y de bloqueo.



En caso de que produzca una falta a tierra, la tensión de la fase en falta colapsa (se hace nula), por lo que se pierde unas de las magnitudes de polarización. Para evitar que se pierda la magnitud de referencia se puede disponer de un sistema de memoria de tensión que compara la intensidad con la tensión de polarización que había justo antes de la falta o utilizar como magnitud de referencia aproximada la tensión homopolar cambiada de signo en el instante de la falta.

- **Relé de distancia o mínima impedancia:** actúa en función del valor de la impedancia por fase del elemento que está protegiendo. El tiempo de disparo depende de la dirección y distancia del punto de localización de la falta al relé, el uso de esta protección es típico en líneas de cierta longitud donde se miden intensidades y tensiones en los extremos de la línea para calcular la impedancia total vista por el relé y la distancia a la que se encuentra la falta.

El ajuste de la protección es el que sigue:

- Si  $Z < Z_M$ , la protección actúa.
- Para proteger toda la línea:  $Z_L = Z_M$

Existen distintas curvas características:

- Característica OHM: el alcance (radio) es igual al módulo de la impedancia de la línea. Detecta defectos hacia delante y hacia atrás (no ofrece direccionalidad).
- Característica MHO: el alcance (diámetro) es igual al módulo de la impedancia de la línea. El diámetro está orientado según el ángulo de la impedancia de la línea y solamente ve defectos hacia delante (ofrece direccionalidad).
- Característica MHO con offset: el alcance (diámetro) es mayor que el módulo de la impedancia de la línea. El offset (alcance hacia atrás) es la diferencia entre el alcance total y el módulo de la impedancia de línea. El diámetro está orientado según el ángulo de la impedancia de la línea (ofrece direccionalidad).

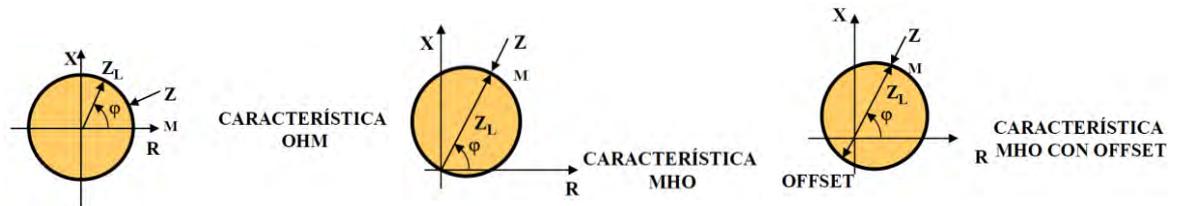


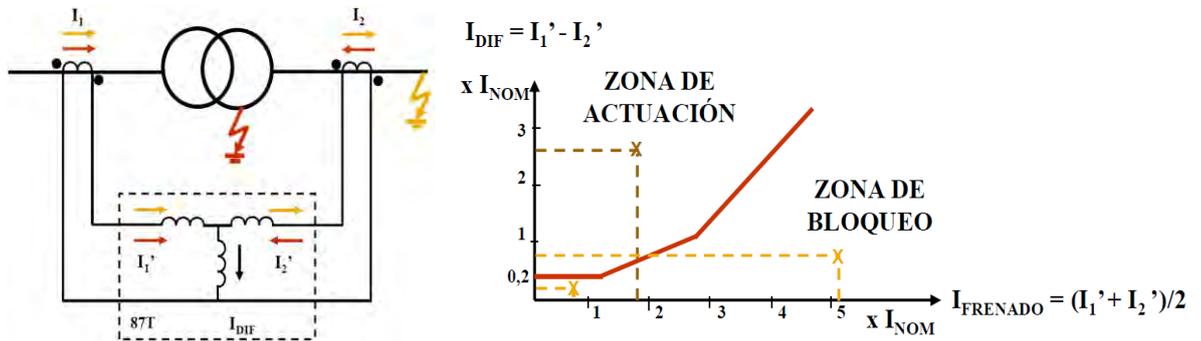
Ilustración 9. Resumen curvas características de la protección de distancia

- **Relé de sobretensión y subtensión:** se emplean para proteger a las máquinas frente a elevaciones o bajadas excesivas de tensión. Los generadores son máquinas muy sensibles a las variaciones de tensión. Nunca deben funcionar con tensiones muy superiores y, especialmente, inferiores a la nominal. Estas anomalías suelen deberse a repentinas pérdidas de carga del generador.

Los relés deben ser temporizados para que den un margen de tiempo suficiente que permita la corrección de la desviación de tensión por medio de los reguladores. Normalmente se usan relés de característica inversa con tiempos de operación entorno a los 2 segundos para una sobretensión del 120% de la tensión nominal del grupo.

- **Relé diferencial:** tiene por objetivo detectar faltas internas (cortes entre fases o desviaciones a tierra) al aparato que protege (típicamente un transformador) por medio de la comparación de las intensidades que miden los transformadores de intensidad que comprenden la zona de la protección diferencial.

La protección diferencial es la protección principal de un transformador. Consta principalmente de los transformadores de intensidad (uno por cada fase) a ambos lados de la máquina y de una bobina diferencial donde se suman las intensidades de ambos lados del transformador y se mide la diferencia entre ellas. La actuación viene determinada por la diferencia entre estas dos intensidades, tal y cómo se muestra a continuación en la característica de la protección diferencial:



*Ilustración 10. Esquema y característica de la protección diferencial*

- $I_1 - I_2$  es la corriente diferencial o corriente de operación.
- $(I_1 + I_2)/2$  es la corriente de frenado o corriente de paso.

Tal y cómo muestra la curva característica, es necesario que la corriente diferencial sea lo suficientemente grande en proporción a la corriente de frenado para que el relé actúe.

- **Relé de sobrefrecuencia y subfrecuencia:** su objetivo es detectar las variaciones de frecuencia en el equipo que protegen. En los sistemas eléctricos de corriente alterna, la frecuencia es una de las magnitudes que mejor refleja la calidad del servicio del sistema eléctrico en cuestión. Es por esto que es necesario mantener la frecuencia estable en su valor nominal tanto en redes malladas como en los equipos conectados a ellas y, muy especialmente, en los sistemas en isla durante los momentos previos a su acoplamiento con la red de potencia infinita.

Las variaciones normales de la frecuencia son aquellas comprendidas entre los 49,85 Hz y los 50,15 Hz (para sistemas cuya frecuencia nominal sean 50 Hz). Los grupos generadores sólo pueden ser desacoplados de la red en caso de que la frecuencia caiga por debajo de los 48 Hz con una temporización de 3 segundos.



---

## 2.2 TIPOS DE DEFECTOS

---

Un cortocircuito es el fallo que se produce en una parte de un sistema eléctrico que permite el paso de la corriente eléctrica a lo largo de una ruta no intencionada. Se desencadena debido a una conexión no deseada entre dos puntos de un circuito entre los que existe una diferencia de tensión, lo que provoca el paso de una intensidad de corriente excesiva que solamente vendrá limitada por la impedancia del circuito equivalente en falta.

Los daños en los elementos constructivos de generadores y transformadores son proporcionales a la energía de la falta, es decir:  $I^2 * t$ . Esto significa que las protecciones eléctricas deben ser capaces de despejar las intensidades de falta en el menor tiempo posible siempre y cuando cumplan con los ajustes de coordinación del sistema.

En cuanto al número de fases afectadas cuando se produce un cortocircuito, existen tres tipos de defectos eléctricos:

- **Monofásicos:** afectan a una fase. Suponen el 80% de los casos. Siempre son cortocircuitos fase-tierra.
- **Bifásicos:** afectan a dos fases. Suponen el 15% de los casos y suelen degenerar en trifásicos.
- **Trifásicos:** afectan a las 3 fases de un sistema eléctrico. Suponen el 5% de los casos.

En cuanto al tipo de contacto que produce el defecto, existen dos tipos de cortocircuitos:



- **A tierra:** el defecto se produce entre una o varias fases del sistema eléctrico en cuestión y la tierra, cerrando el cortocircuito. Pueden ser: fase-tierra, bifásico a tierra y trifásico a tierra (igual que el trifásico).
- **Entre fases:** el defecto se produce debido a que dos o tres fases entran en contacto. Pueden ser: bifásicos y trifásicos.

Las consecuencias de los cortocircuitos pueden ser fatales no sólo para la integridad de las personas sino para la de los elementos de un sistema eléctrico. Algunas de las consecuencias más dañinas para los elementos que soportan carga eléctrica son: la degradación de los aislantes e incluso la fundición de los conductores, llegando a provocar un incendio en los peores casos; los sobreesfuerzos electrodinámicos a los que se ven sometidos, por ejemplo, los devanados de un transformador; la inestabilidad y/o la pérdida de sincronismo de las máquinas que sufren un defecto; entre otras.

Los defectos o incidencias más habituales a las que hacen frente los generadores eléctricos, que son el objeto de estudio de este proyecto, se pueden clasificar en tres tipos:

- Faltas a tierra y entre fases.
- Incidencias causantes de sobrefuncionamiento de la máquina.
- Fallos por funcionamiento anómalo.

Estos tres tipos de incidencias se abordarán en detalle en el **Capítulo 4** de la memoria, incluyendo una enumeración y una explicación de las distintas protecciones que son necesarias para asegurar el correcto funcionamiento del grupo de generación.



---

## 2.3 ACTUACIÓN DE LAS PROTECCIONES DEL GENERADOR

---

### 2.3.1 Alarma y señalización

La alarma es la actuación de menor entidad en lo que se refiere a la actuación, propiamente dicha, en sistemas de protección. En caso de que la anomalía no comprometa la continuidad del servicio del generador, la alarma es una actuación suficiente. Según la naturaleza de la alarma, pueden ser:

- **Preventivas:** ocurren cuando el defecto no es determinante para el funcionamiento del sistema. Es el caso de un relé que detecta un valor de tensión bajo en una batería pero no lo suficientemente bajo como para que provoque una actuación.
- **Correctivas:** la alarma indica qué relés han disparado una vez que la protección ya ha actuado.

En cuanto al concepto de señalización, se podría decir que es más amplio que el de alarma. Éstas se recogen en el mismo relé que las detecta y se muestran, o señalizan, de forma global en un panel de alarmas local y/o en un sistema de control a distancia (telemando).

### 2.3.2 Disparo del interruptor de grupo o desconexión de red

El interruptor del grupo es el encargado de desacoplar el generador a la red en caso de que se produzca un defecto interno o externo. Puede estar en baja o alta tensión, en el caso del generador que se va a estudiar, el interruptor de grupo está en alta tensión (19kV).

Típicamente, hay centrales de generación con o sin el interruptor de grupo. En el caso de este proyecto sí que hay un interruptor, tal y como se puede ver en el primer plano del **Capítulo 1**



**Planos de la C.T.C.C de Tarragona**, por lo que la excitación para arrancar el grupo generador se realiza desde la barra auxiliar de 6,6kV sin necesidad de un transformador auxiliar de excitación.

### 2.3.3 Disparo del interruptor de campo o desexcitación

En caso de que se produzca un defecto interno, esto es, dentro de la zona del generador, no será suficiente con la apertura del interruptor de grupo puesto que el generador seguirá alimentando la falta. En esta situación será necesario recurrir al disparo del interruptor de campo.

El interruptor de campo conecta la excitación al devanado de campo. En el momento de su apertura elimina la tensión del generador y, por tanto, también elimina la aportación de corriente del generador a la falta. Sin embargo, la apertura del interruptor de desexcitación provoca una sobretensión (debido a la energía almacenada en el devanado de excitación) y, para evitarla, se conecta una resistencia en paralelo, un crowbar o un puente de tiristores en antiparalelo.

### 2.3.4 Parada mecánica

Ante el caso de un defecto grave, se puede dar la situación de que sea necesario parar el grupo para aislarlo de la falta. Dependiendo de la gravedad de la falta se pueden realizar tres tipos de paradas:

- **Parada normal:** se realiza cuando se producen defectos que no requieren una parada inmediata. Se procede de la siguiente forma: primero se baja la carga del generador; después se consigue una potencia reactiva nula por medio de la regulación de la tensión de excitación; luego se abre el interruptor de grupo, desacoplándolo de la red;



más tarde se hace nula la excitación en bornes y, finalmente, se cierran las válvulas y se frena mecánicamente el rotor.

- **Parada rápida:** este tipo de parada se realiza cuando se producen defectos que sí requieren una parada inmediata. El modo de proceder es el mismo que una parada normal sólo que no se realiza una bajada de carga antes de desacoplar el grupo de la red. Este tipo de parada puede dar lugar a sobrevelocidades.
- **Parada de emergencia:** se realiza en las mismas condiciones que la parada rápida pero añadiendo el cierre brusco de válvulas, compuertas y otros elementos mecánicos. Este tipo de parada supone un riesgo de embalamiento del generador por lo que es la más peligrosa.

### 2.3.5 Actuación contra incendios

En el pasado, los aislamientos internos del generador utilizaban materiales combustibles. Esto implicaba que cuando se producía un defecto dentro del generador, como un cortocircuito bifásico entre fases, era necesario inundar la sala con CO<sub>2</sub> o cualquier otro gas inerte para prevenir un incendio.

Actualmente, los aislamientos internos del generador se fabrican con materiales ignífugos, por lo que no es necesaria la instalación de sistemas antiincendios de inyección de gas a presión.



---

## Capítulo 3 CARACTERIZACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Como ya se ha descrito en capítulos anteriores, el objetivo de este proyecto es establecer un sistema de protecciones eficaz y seguro para un grupo generador. El principal problema que aparece es el planteamiento del sistema eléctrico en el que se encuentra el grupo y el cálculo de los valores que definirán la esencia del sistema, a fin de poder implementarlo en el programa PSS/E de Siemens con el que se obtendrán los distintos casos de faltas que se pueden producir en el sistema eléctrico de la central térmica de Tarragona.

### ***3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y DEL GRUPO GENERADOR***

---

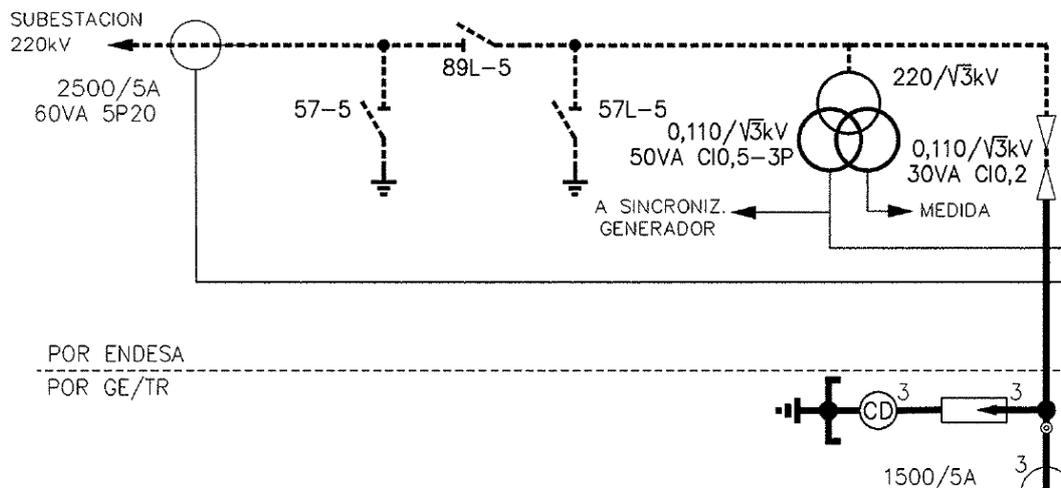
La planta de generación de la central térmica de ciclo combinado de Tarragona consta de cuatro niveles de tensión principales (220kV, 19kV, 25kV y 6,6kV) así como de cuatro zonas o nudos claramente diferenciados (red infinita, generador, alimentación secundaria de fábricas y servicios auxiliares de la central). La extensión de la planta en su totalidad puede apreciarse en los planos que se adjuntan el anexo de este documento.

Las características de los principales elementos del sistema y del grupo generador se enumeran a continuación:

- **Red 220kV:** se trata de una red de potencia infinita de 220kV. Para determinar las corrientes de cortocircuito se ha empleado la información recogida en el “Informe Anual de la Evolución de la Potencia de Cortocircuito en la red de transporte del Sistema Eléctrico Peninsular en el año 2013” redactado por Red Eléctrica de España (REE14), donde se pueden encontrar los valores medios estadísticos y máximos de las

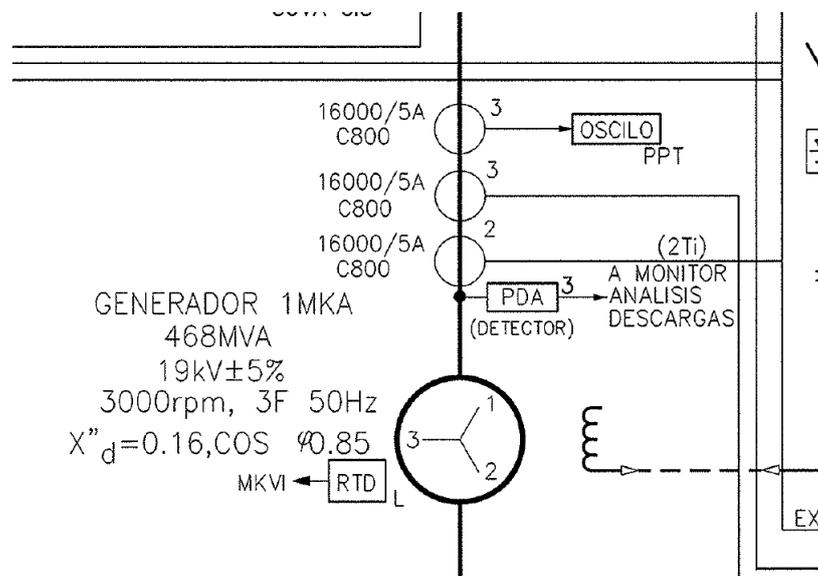
intensidades de cortocircuito en las distintas zonas del sistema eléctrico español. En este caso, la zona correspondiente a Tarragona. Las principales características de la red son:

- Tensión: 220kV.
- Corriente de cortocircuito trifásica máxima: 25kA. (Media: 13,9kA).
- Corriente de cortocircuito monofásica máxima: 28kA. (Media: 14,7kA).



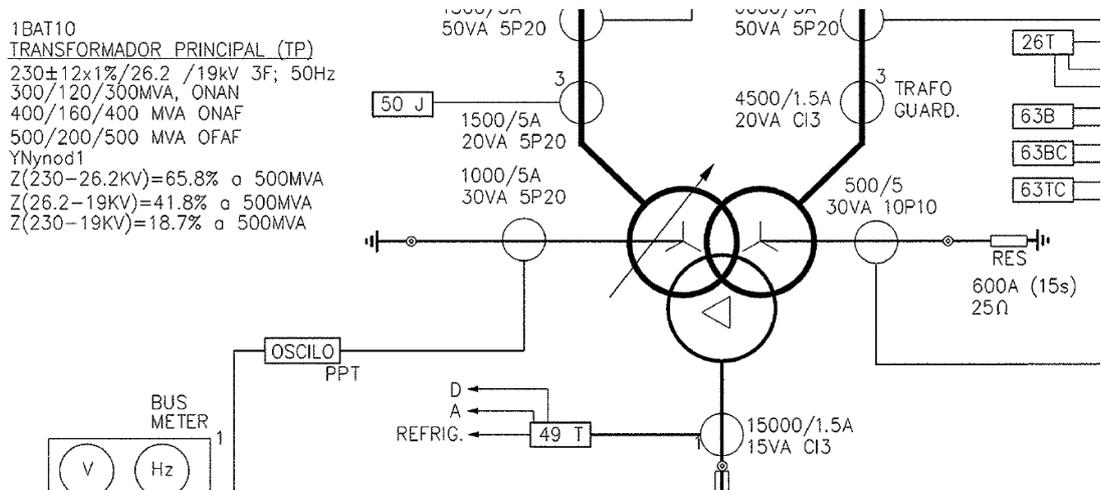
*Ilustración 11. C.T.C.C. Tarragona, zona Red 220kV*

- **Generador eléctrico:** es la máquina para la cual se van a diseñar las diversas protecciones que se explican en esta memoria. El fabricante es General Electric y sus principales características son:
  - Potencia nominal: 468 MVA.
  - Tensión nominal: 19kV  $\pm$  5%.
  - Intensidad nominal: 14,22kA.
  - Velocidad nominal: 3000 rpm.
  - Frecuencia nominal: 50Hz.
  - Factor de potencia nominal: 0,85.
  - Reactancia síncrona ( $X_d$ ) no saturada: 2,11 p.u.
  - Reactancia transitoria ( $X'd$ ) no saturada: 0,26 p.u.
  - Reactancia subtransitoria ( $X''d$ ) no saturada: 0,16 p.u.



*Ilustración 12. C.T.C.C. Tarragona, zona Generador*

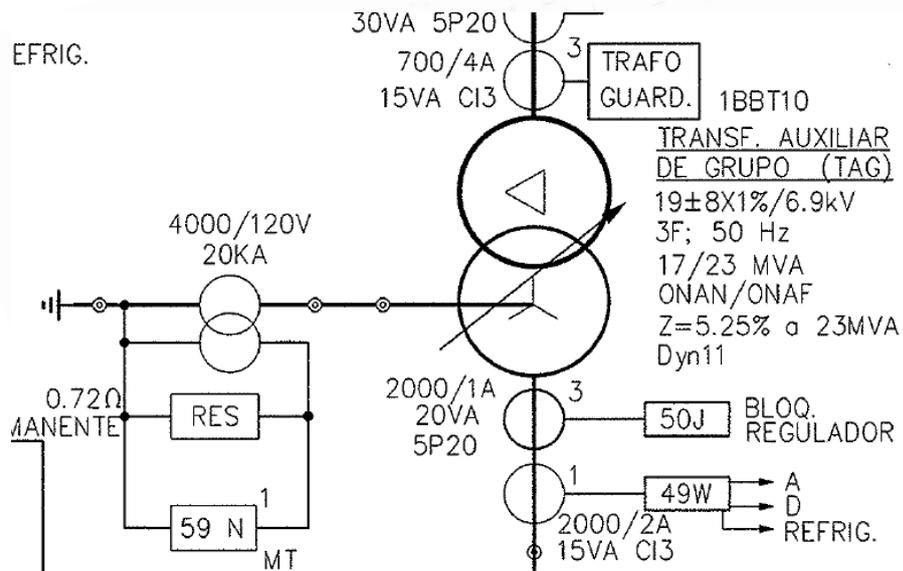
- **Transformador principal:** se trata de un transformador con tres devanados fabricado por ABB. Sus características son las que siguen:
  - Potencias nominales: 500 / 200 / 500 MVA (OFAF).
  - Tensiones nominales: 230 / 26,2 / 19 kV.
  - Intensidades nominales: 1255 / 4390 / 15193 A.
  - Impedancias de cortocircuito: 65,8% (230-26,2kV) / 41,8% (26,2-19kV) / 18,7% (230-19kV).
  - Grupo de conexión: YNyn0d1.



*Ilustración 13. C.T.C.C. Tarragona, transformador principal*

- **Transformador auxiliar:** transformador de 2 devanados fabricado por ABB. Las características del transformador son:

- Potencia nominal: 23 MVA (ONAF).
- Tensiones nominales: 19 / 6,6kV kV.
- Intensidades nominales: 699 / 2012 A.
- Impedancia de cortocircuito: 5,25%.
- Grupo de conexión: Dyn11.



*Ilustración 14. C.T.C.C. Tarragona, transformador auxiliar*



- **Transformadores de medida:** son los diversos transformadores de intensidad que se instalan en la planta de generación para medir las intensidades que pasan por los aparatos y elementos con el objeto de protegerlos. Los distintos sistemas de protecciones se sirven de las intensidades que miden los transformadores de intensidad. Los principales que se pueden encontrar en los planos de la central térmica son los siguientes:
  - Salida del generador: 16000 / 5A, C800.
  - Puesta a tierra del generador: 16000 / 5A, C800.
  - Lado 220kV transformador principal: 1500 / 5A, 50VA, 5P20.
  - Lado 25kV transformador principal: 6000 / 5A, 50VA, 5P20.
  - Lado 19kV transformador principal: 16000 / 5A, 50VA, 5P20.
  - Puesta a tierra devanado 220kV transformador principal: 1000 / 5A, 30VA, 5P20.
  - Puesta a tierra devanado 25kV transformador principal: 500 / 5A, 50VA, 10P10.
  - Lado 19kV transformador auxiliar: 16000 / 5A, 30VA, 5P20.
  - Lado 6,6kV transformador auxiliar: 2000 / 1A, 20VA, 5P20.
  
- **Transformador de puesta a tierra del generador:** es el encargado de reducir el nivel de tensión en la puesta a tierra del generador. En el secundario se conecta una resistencia a tierra que será la encargada de limitar la corriente que circula por la puesta a tierra del generador en caso de que se produjera una falta a tierra interior (entre el transformador y el grupo).
  - Transformador de tensión: 12000 / 240V, 35kVA.
  - Resistencia de puesta a tierra: 0,496 Ohm, 443A, 10 min.

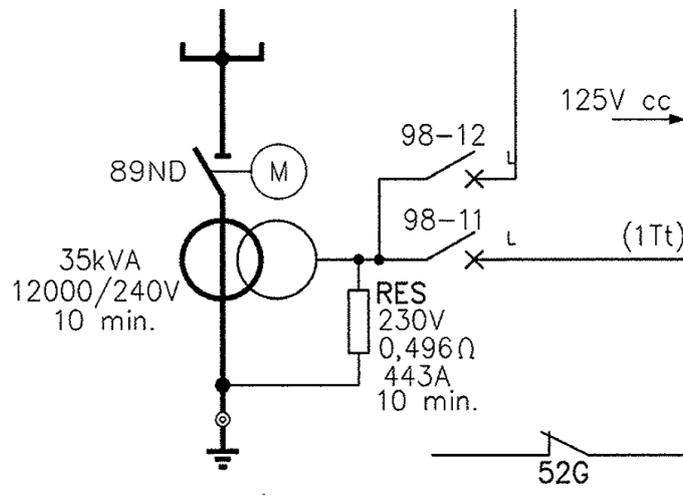
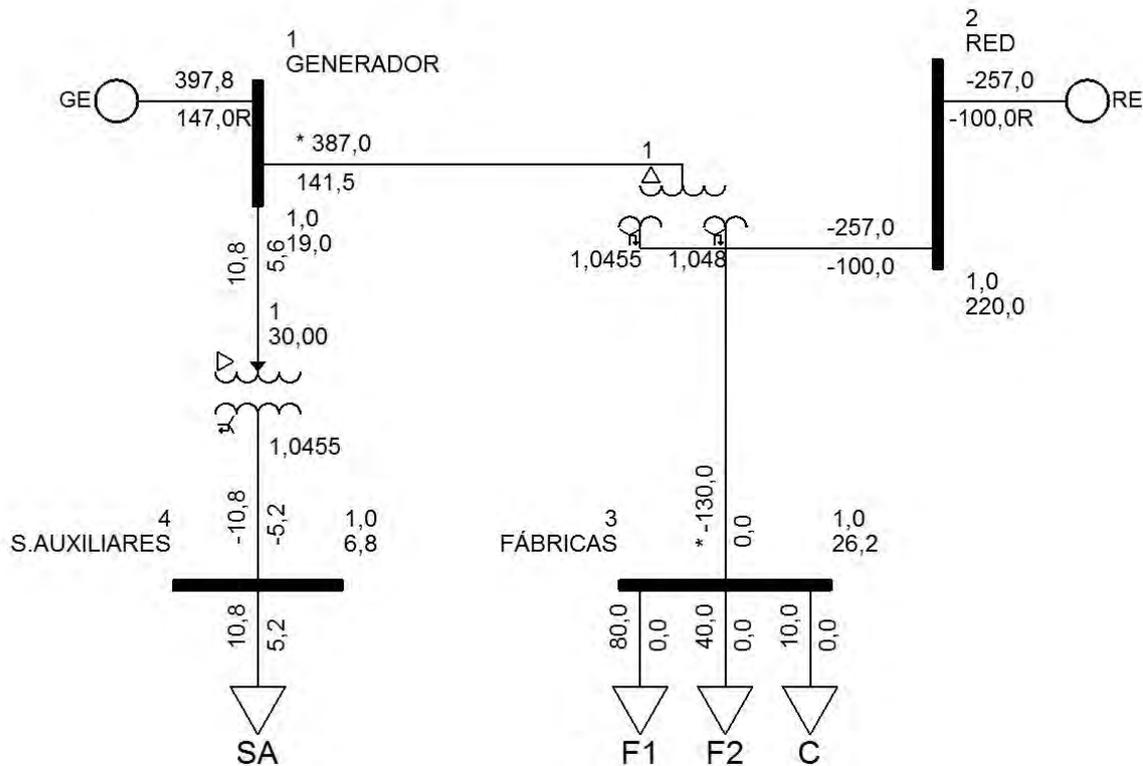


Ilustración 15. C.T.C.C. Tarragona, transformador de puesta a tierra del generador

- **Protecciones del generador:** las distintas funciones de protección del generador se explicarán en detalle en el **Capítulo 4**, apartado **4.1**.
- **Protecciones del transformador principal:** al igual que las funciones de protección del grupo generador, los equipos de protección del transformador principal se explicarán en detalle en el **Capítulo 4**, apartado **4.2**.

### 3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN EL SOFTWARE PSS/E

Una vez que se definen los distintos parámetros que configuran los principales aparatos eléctricos del sistema (generador, transformadores y consumos), se procede a la confección de éste en el programa de simulación de redes y faltas PSS/E. Se introducen los valores necesarios para definir los elementos mencionados anteriormente y se llega al esquema de simulación que se muestra a continuación:



*Ilustración 16. Diagrama del sistema eléctrico equivalente de la C.T.C.C de Tarragona en PSS/E*

En la ilustración superior se muestra el sistema eléctrico después de haberse realizado la simulación del flujo de cargas. Sobre el mismo diagrama de muestra el flujo de potencias entre los distintos nudos mencionados anteriormente. Al crear estos nudos (o buses) en el programa es necesario especificar algunas características para que la simulación sea correcta:

- Nudo 1 GENERADOR. Type code: 2 – Generator Bus.
- Nudo 2 RED. Type code: 3 – Swing Bus.
- Nudo 3 FÁBRICAS y nudo 4 S.AUXILIARES. Type code: 1 – Non-Gen Bus.



Una vez realizado el flujo de cargas se puede observar que los nudos del grupo generador y de la red de potencia infinita han mantenido sus tensiones constantes (19 y 220kV respectivamente) a diferencia de los nudos de las fábricas y de los servicios auxiliares (26,2 y 6,8kV cuando deberían ser 25 y 6,6kV respectivamente). Esto se debe a que la red es de potencia infinita y que los nudos formados por consumos poseen una carga mucho menor que los del generador y la red.

También se puede apreciar cómo el grupo generador es el único elemento que inyecta potencia activa y reactiva en el sistema mientras que la red, los servicios auxiliares y las fábricas la consumen. A continuación se muestra una tabla en la que se resume el flujo de carga en el sistema según criterio generador:

	Nudo 1: GENERADOR	Nudo 2: RED	Nudo 3: FÁBRICAS	Nudo 4: S.AUXILIARES
Potencia activa	397,8 MW	-257 MW	-130 MW	-10,8 MW
Potencia reactiva	147 Mvar	-100 Mvar	0 Mvar	-5,2 Mvar
Tensión	19kV	220kV	26,2kV	6,8kV

Tabla 1. Resumen flujo de carga del sistema

En el caso del nudo de las fábricas, su consumo de reactiva es nulo debido a que el factor de potencia de las fábricas y las calderas del sistema es prácticamente la unidad.



## **Capítulo 4 DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE PROTECCIÓN NECESARIAS**

En este capítulo se explicarán las funciones de protección que necesita el sistema eléctrico que se analiza en este proyecto para que esté en servicio siempre que sea posible y, en caso de no ser así, para evitar mayores consecuencias que afecten a la integridad de sus componentes. Para ello se necesitan sistemas de protección en los dos elementos más críticos del sistema: el generador y el transformador principal.

El alternador puede verse afectado por perturbaciones de la red, pero también por averías internas en sus arrollamientos del rotor y estator.

Al igual que el generador, el transformador principal se ve afectado por causas externas (sobretensiones, fallos en la red, etc.) e internas (circuito de refrigeración, dieléctrico, núcleo magnético, entre otras.).

### **4.1 EQUIPOS DE PROTECCIÓN PARA EL GENERADOR**

---

El nivel de protección de los grupos depende de la potencia de los mismos y es algo que únicamente se puede optimizar desde la experiencia, ya que, aumentar demasiado el número de protecciones incrementa la probabilidad de actuaciones no deseadas y quedarse corto puede desproteger en exceso al grupo.

#### 4.1.1 Protecciones de faltas a tierra y entre fases

Las protecciones que se explican en los siguientes puntos protegen al generador frente a faltas a tierra en el estator, faltas a tierra en el rotor y faltas entre fases.

##### 4.1.1.1 Protecciones contra defectos a tierra del estator

A pesar de los avances que ha habido en asilamientos durante los últimos años, los contactos a tierra siguen siendo una de las averías más frecuentes en los generadores. Este tipo de falta se produce cuando falla el aislamiento de una fase a tierra. Los efectos producidos por una falta a tierra son:

- Sobreintensidades desde una bobina del estator a la chapa magnética del mismo. Los daños son proporcionales a la energía de la falta, es decir,  $I^2 * t$ .

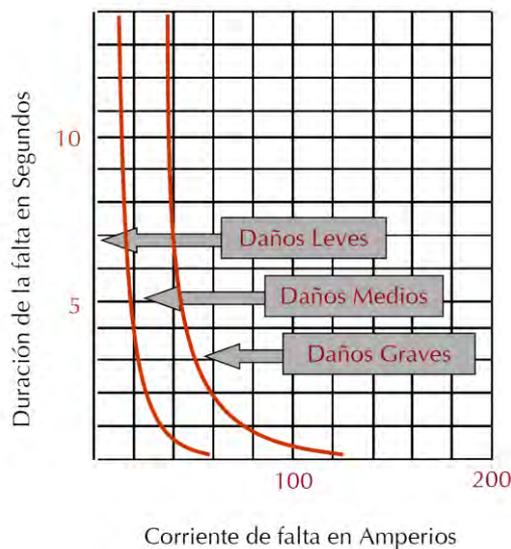


Ilustración 17. Curvas indicadoras de los daños en el generador

- Sobretensiones en fases sanas. Estas sobretensiones pueden llegar a provocar otra falta en las bobinas de las fases sanas dando lugar a que una falta monofásica a tierra evolucione a una falta bifásica a tierra. Las tensiones en las fases sanas dependen de la forma de puesta a tierra del neutro. Estas pueden llegar a ser la tensión compuesta,

debido a esto, los aislamientos de los arrollamientos en las fases sanas pueden verse afectados.

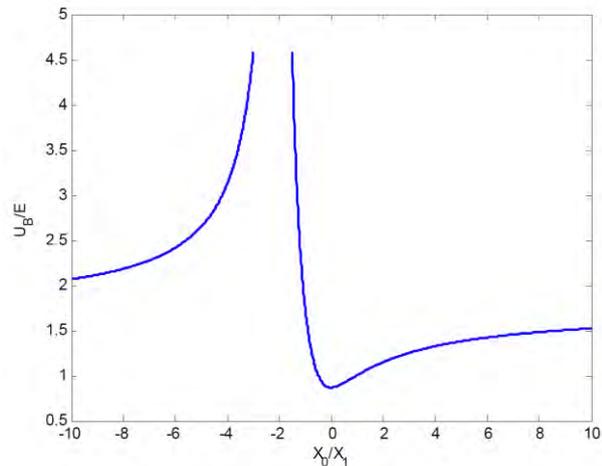


Ilustración 18. Tensión en las fases sanas en caso de falta a tierra

Para limitar la intensidad que circula por el generador cuando se produce una falta, se pone el neutro a tierra a través de una resistencia. La puesta a tierra se realiza mediante un transformador monofásico de potencia que permite reducir el valor de la resistencia óhmica que se conecta en el secundario del mismo. La impedancia de secuencia homopolar vista desde terminales es la misma que la del generador y será la que limite la corriente de falta monofásica en caso de un defecto interno. Esta impedancia es prácticamente la resistencia de puesta a tierra del generador, por lo que es casi puramente resistiva y, en el caso del generador a estudiar, limita la intensidad de falta a 10A.

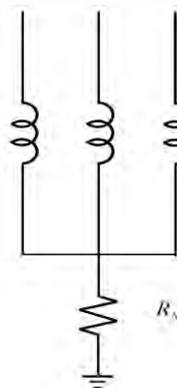
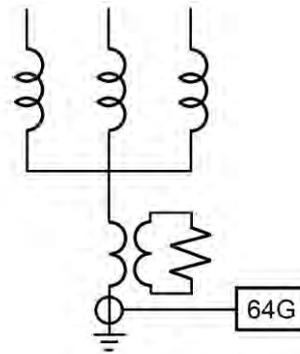


Ilustración 19. Puesta a tierra del neutro del generador

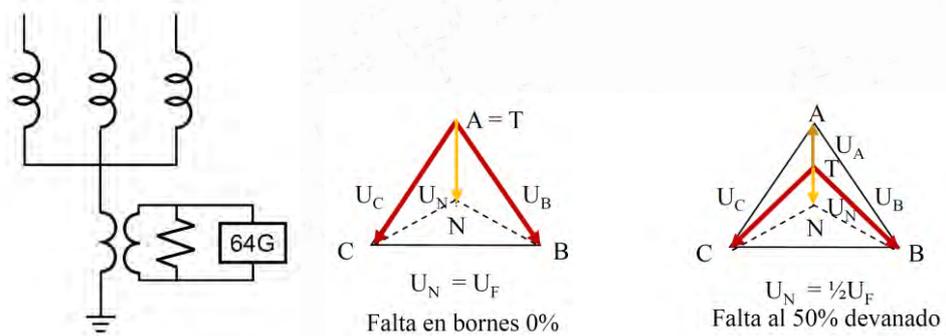
Existen dos protecciones contra defectos a tierra del estator:

- **Protección a tierra en el estator (64G):** está formada principalmente por tres relés:
  - Relé de máxima intensidad de neutro: vigila la intensidad que circula por el generador a tierra cuando se produce una falta.



*Ilustración 20. Relé de máxima intensidad de neutro de la 64G*

- Relé de máxima tensión de neutro: la tensión del neutro es proporcional al número de espiras entre el neutro y el punto de falta, tal y como se muestra en la siguiente ilustración.



*Ilustración 21. Relé de máxima tensión de neutro de la 64G*

Cuanto menor sea el ajuste, mayor parte del devanado estará vigilado. No obstante, hay un límite para el ajuste (no se puede vigilar el 100% del

devanado). Lo más típico es realizar un ajuste al 5% de tensión con el que se protege el 95% del devanado.

- Relé diferencial homopolar: en caso de producirse una falta a tierra en una de las fases  $\rightarrow I_a + I_b + I_c \neq I_0$ . La protección diferencial actúa ya que la intensidad homopolar no es nula.

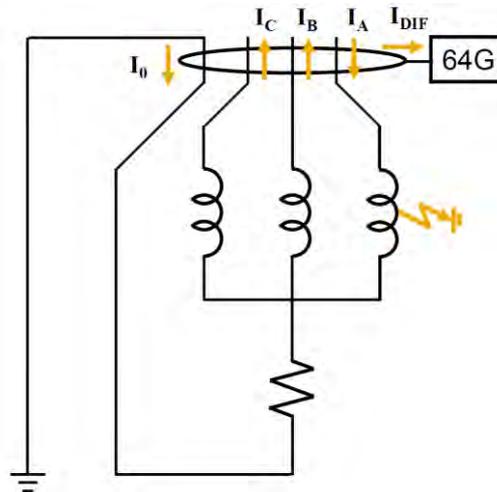


Ilustración 22. Relé diferencial homopolar de la 64G

Con los 3 relés principales, ha quedado el 5% del devanado sin proteger, no obstante una falta en el 5% del devanado sin proteger no es grave salvo que se produzca una segunda falta fase-tierra que evolucione en una bifásica. Es por esto que, en máquinas grandes como la que se estudia, son necesarios tres relés adicionales con los que se detectan faltas en el 100% del devanado:

- Mínima tensión de 3<sup>er</sup> armónico.
  - Inyección de una señal codificada.
  - Diferencial de 3er armónico.
- **Protección a tierra en barras (64B):** en caso de una falta a tierra en barras de generación, la 64B se comporta como la protección principal y la 64G pasa a ser protección de respaldo.

El esquema general de las protecciones contra defectos a tierra del estator queda según la siguiente ilustración:

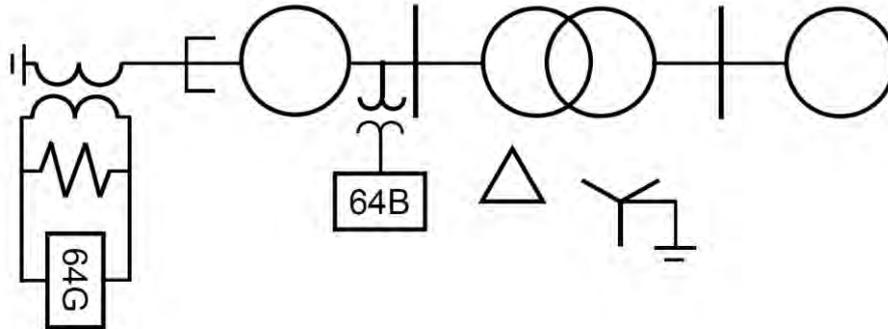


Ilustración 23. Esquema de protecciones contra defectos a tierra del estator

#### 4.1.1.2 Protecciones contra defectos a tierra del rotor

En el rotor, el devanado de campo es un circuito de corriente continua sin puesta a tierra en el cual una primera falta da lugar a corriente prácticamente inapreciable que no provoca daños. No obstante, si se produce una segunda falta se provoca una corriente de falta continua elevada que dará lugar a daños en el devanado de campo y en la chapa del rotor. La protección necesaria para prevenir los daños en caso de falta en el rotor es:

- **Protección a tierra en el rotor (64R):** se encarga de proteger la integridad del rotor en caso de defectos. Esta protección está formada por tres tipos de relés:
  - Relé de corriente alterna: se encarga de inyectar una pequeña cantidad de corriente alterna por un circuito desacoplado del circuito de continua por medio de dos condensadores. En caso de que se produzca una falta, el relé cortocircuita la capacidad a tierra del devanado por lo que tanto la corriente alterna como la continua serán bajas (ambas debido a la acción de los condensadores de desacoplo  $C_1$  y  $C_2$ ).

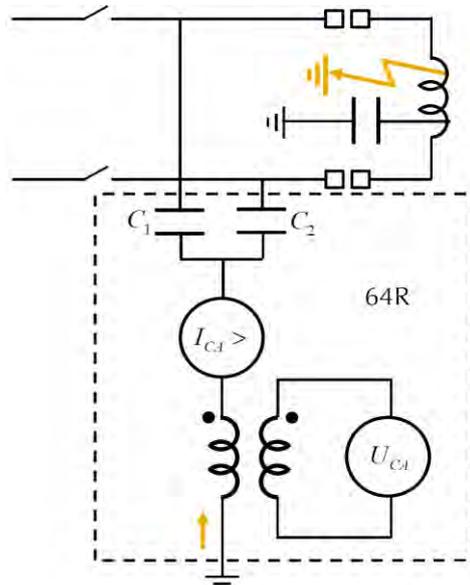


Ilustración 24. Relé de corriente alterna de la 64G

- Relé de corriente continua: inyecta una pequeña cantidad de corriente continua por un circuito conectado a través de una resistencia de gran valor. En caso de una falta el relé cortocircuita la capacidad a tierra del devanado dando lugar a una corriente de falta baja (limitada por la resistencia R).

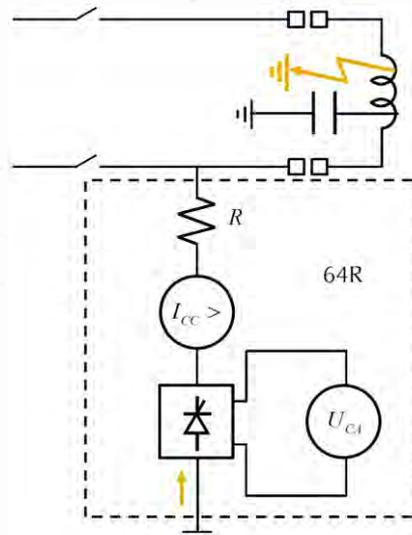
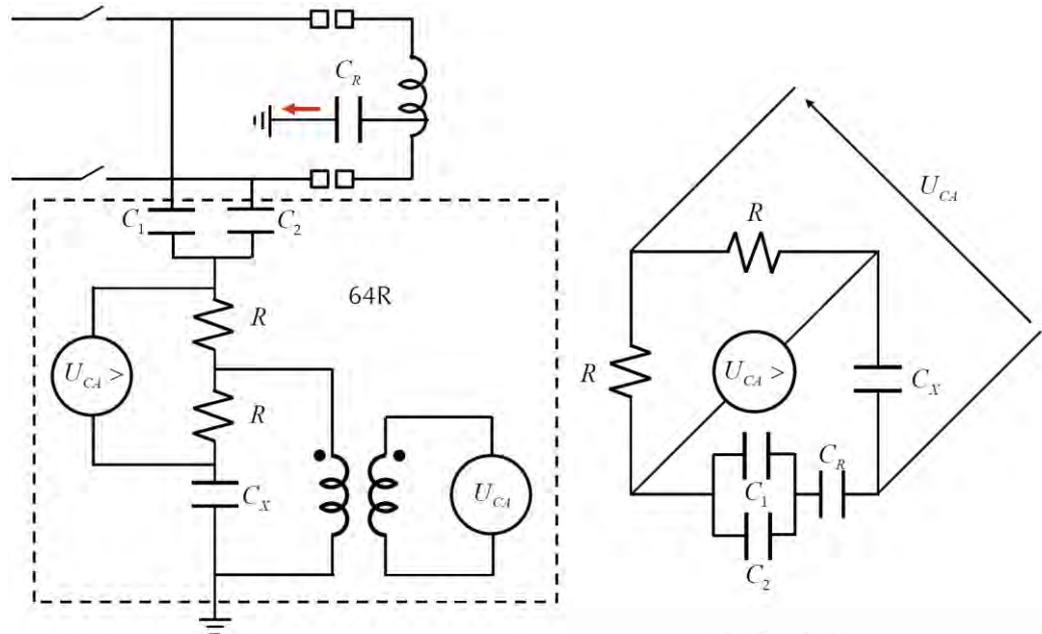


Ilustración 25. Relé de corriente continua de la 64G

- Relé de medida de capacidad: se encarga de medir la capacidad del devanado del rotor  $C_R$  ajustando la capacidad  $C_X$ . En condiciones normales el puente está equilibrado. Sin embargo, en condiciones de falta la capacidad del rotor  $C_R$  varía desequilibrando el puente ( $U_{CA} \neq 0$ ) tal y como se muestra en las siguientes figuras de la ilustración:



*Ilustración 26. Relé de medida de capacidad de la 64R*

#### 4.1.1.3 Protecciones contra defectos entre fases

Las faltas entre fases son las más graves que se pueden dar en un generador debido a las elevadas corrientes en las bobinas de los devanados, en los aislamientos y en la chapa magnética del generador; a esto se suman los esfuerzos mecánicos que tienen que soportar las bobinas y el eje de la máquina. Para proteger a los grupos de las faltas entre fases se utilizarán distintas protecciones, siendo la principal la diferencial y la diferencial de bloque, sobreintensidad y la de distancia las protecciones de respaldo.

- **Protección diferencial (87G):** consta de un relé por cada fase. Solo actúa en caso de faltas internas, es decir, cuando la suma de  $I_1'$  y de  $I_2'$  medida por la bobina diferencial

es distinta de cero. El esquema de la protección y su curva característica son los que se mostraron en la **Ilustración 10**.

- **Protección diferencial de bloque (87TG)**: la curva característica es prácticamente la misma que en la protección diferencial. La diferencia está en que al ser una protección de respaldo, incluye en su lazo de actuación al transformador y está temporizada.

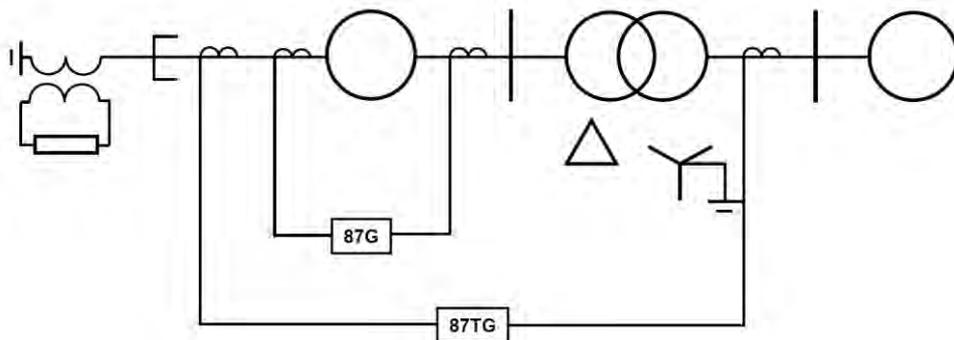


Ilustración 27. Esquema de la protección diferencial de bloque.

- **Protección de sobreintensidad (51G)**: detecta sobreintensidades en los devanados del estator bien debido a faltas internas o externas entre fases o bien debido a anomalías en el generador. Protege todo el embarrado de generación y parte del de transformación. Actúa como respaldo de la protección diferencial y se ajusta con característica inversa coordinada con la del transformador. Se dispone en el lado del neutro ya que, de esta forma, permite ver faltas con el generador desacoplado de la red.

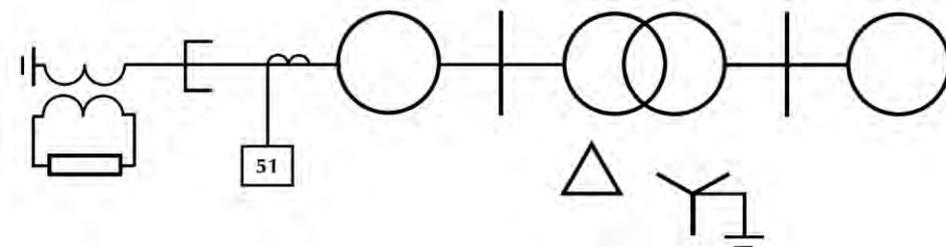


Ilustración 28. Disposición de la protección de sobreintensidad 51G

- **Protección de distancia (21):** vigila la impedancia ( $Z = U/I$ ) y detecta faltas entre fases y a tierra. Protege el embarrado de generación y hasta el 80% del de transformación aproximadamente. Los transformadores de corriente pueden colocarse en el lado del neutro o en el lado de los bornes terminales. En el caso del generador que se estudia, la disposición de los transformadores de intensidad es en el lado del neutro tal y como se muestra a continuación (característica MHO):

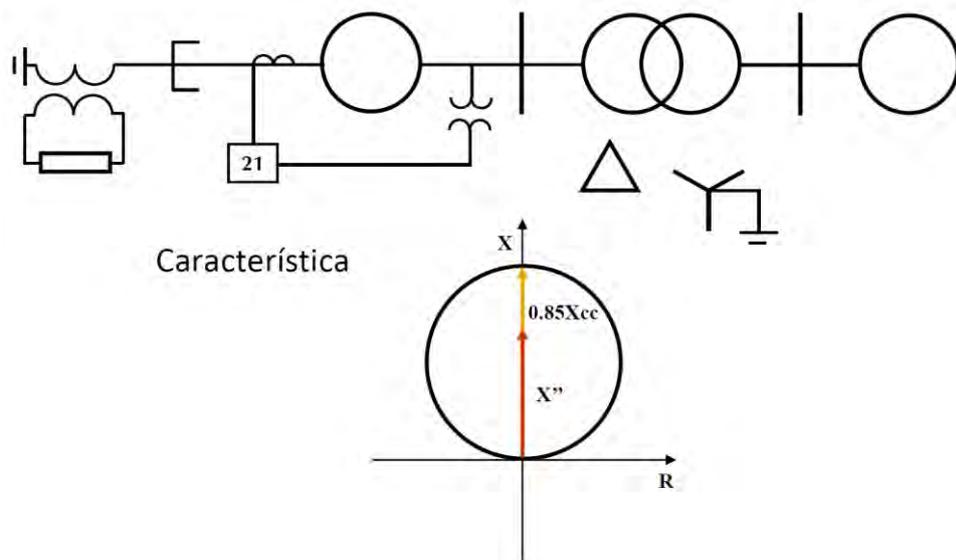


Ilustración 29. Disposición y característica de la protección de distancia

El ajuste de la primera zona se realiza, como ya se ha mencionado, desde el generador hasta el 80% del transformador con una temporización típica de 200 ms. El ajuste de la segunda zona se realiza típicamente hasta el 20% de las líneas adyacentes con una temporización de 1 s.

#### 4.1.2 Protecciones de sobrefuncionamiento del generador

En este apartado se tratan las incidencias que provocan problemas térmicos en los componentes de los generadores. Las curvas características de las protecciones son todas inversas debido a que se trata de proteger frente a energía (térmica) disipada.

#### 4.1.2.1 Protección contra sobrecarga del estator

Se trata de la protección 49 y detecta sobrecargas térmicas inadmisibles en los devanados del estator debido a la circulación de intensidades superiores a la nominal. Típicamente se deben a variaciones en las condiciones de generación de potencia activa y/o reactiva. Las sobrecargas térmicas producen un envejecimiento de los aislamientos, lo que causa un mayor riesgo de sobretensiones en caso de faltas a tierra.

Los relés de esta protección son los encargados de vigilar la temperatura de los devanados del estator. Los más importantes son:

- **Sonda de temperatura:** formada por resistencias variables con la temperatura, alimentadas por una fuente de corriente continua, conectadas en paralelo entre sí y que se distribuyen a lo largo de los devanados del estator. Cuando la temperatura aumenta el valor de las resistencias disminuye y, por tanto, se produce un aumento de la corriente circulante que hace saltar al relé encargado de la actuación.

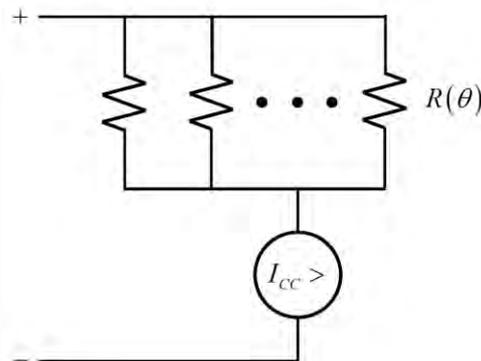


Ilustración 30. Sonda de temperatura de la 49

- **Relé de imagen térmica:** mide la intensidad de fase por medio de una masa metálica cuya constante de tiempo de calentamiento y enfriamiento es similar a la de los devanados del estator del generador.

- **Relé digital de sobrecarga térmica:** mide la intensidad de línea integrando la energía disipada en los devanados y vigila que no se superen los valores de su curva característica.

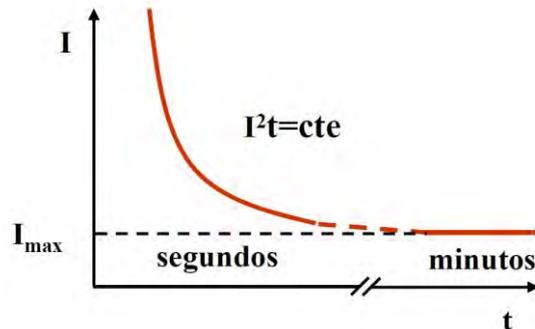


Ilustración 31. Característica de la protección contra sobrecarga del estator

El ajuste típico de la intensidad de arranque de este relé es al 110% de la intensidad nominal del grupo, siendo ligeramente más rápida que el de la protección 51G.

#### 4.1.2.2 Protección contra sobrecarga del rotor

Es la protección 49R y, al igual que la del estator, detecta sobrecargas térmicas inadmisibles en el devanado del rotor debido a la circulación de intensidades superiores a la nominal. Se deben, en general, a variaciones de las condiciones de generación de potencia reactiva (sobreexcitación). Los relés de esta protección son los mismos que los de su hermana gemela (49) y están explicados en el apartado anterior.

#### 4.1.2.3 Protección de secuencia inversa

Esta protección es la número 46 y detecta corriente de secuencia inversa en las intensidades de línea. La corriente de secuencia inversa puede deberse a faltas bifásicas, apertura de fases, desequilibrio de cargas, desequilibrios constructivos en los devanados del estator, etc. Este tipo de corrientes crean un campo magnético giratorio con un sentido de giro contrario al creado por las corrientes de secuencia directa, por lo tanto, crean un par que se opone al momento de fuerzas que impulsa al rotor. Todo esto se traduce en vibraciones indeseadas en la turbina y en el eje y calentamientos en el devanado del rotor y en sus chapas magnéticas.

La corriente de secuencia inversa máxima admisible está normalizada, en el caso del generador de este proyecto, es de un 10% la intensidad nominal. El ajuste típico de la protección de secuencia inversa se recoge en la siguiente imagen, donde la intensidad de arranque será inferior a la intensidad de secuencia inversa máxima admisible.

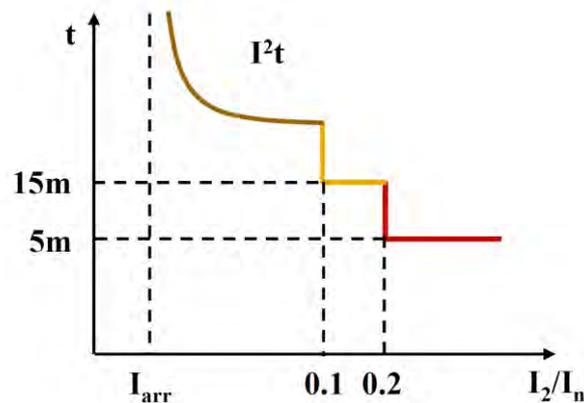


Ilustración 32. Ajuste de la protección de secuencia inversa

#### 4.1.2.4 Protección de sobretensión

Como ya se ha mencionado anteriormente, las sobretensiones son la principal causa de daño a los aislamientos. Se pueden producir debido al desacoplamiento del generador estando sobreexcitado, a anomalías en el regulador de tensión y a defectos del tipo fase-tierra mantenidos. Esta protección es la número 59 y el ajuste típico es el siguiente:

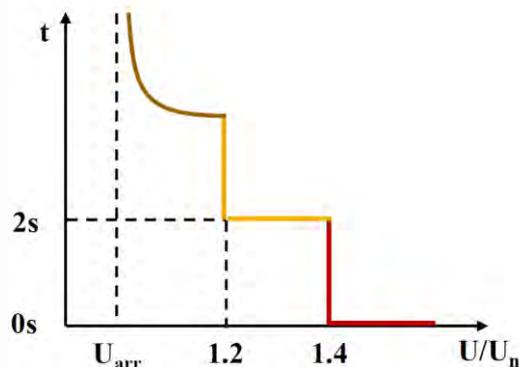


Ilustración 33. Ajuste de la protección de sobretensión

### 4.1.3 Protecciones de funcionamiento anómalo del generador

Este tipo de protecciones son las encargadas de proteger a los generadores ante situaciones inusuales y, generalmente, peligrosas para la integridad de la máquina.

#### 4.1.3.1 Protección de pérdida de excitación

Se trata de la protección número 40. La pérdida de excitación puede deberse a anomalías en la excitatriz o en el regulador de tensión, a aperturas imprevistas del interruptor del devanado de campo, a defectos en el devanado de campo, entre otros motivos. La pérdida de excitación hace que la máquina síncrona pase a funcionar como una máquina asíncrona, por lo que pasa a consumir grandes cantidades de potencia reactiva, puede perder su estabilidad o incluso embalsarse. Para evitar estos problemas, la protección 40 dispone de dos tipos de relés:

- **Relé de mínima corriente de excitación:** vigila que la corriente de excitación nunca baje de un valor mínimo. Para ello utiliza un relé de mínima tensión de corriente continua.

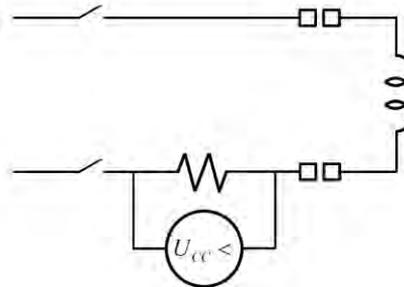
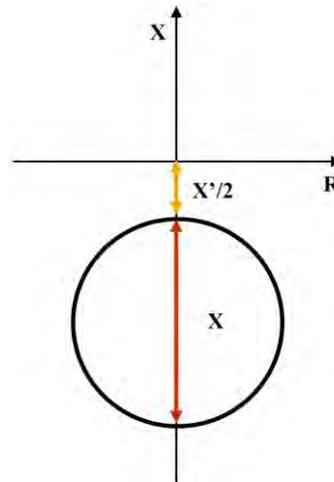


Ilustración 34. Relé de mínima corriente de excitación

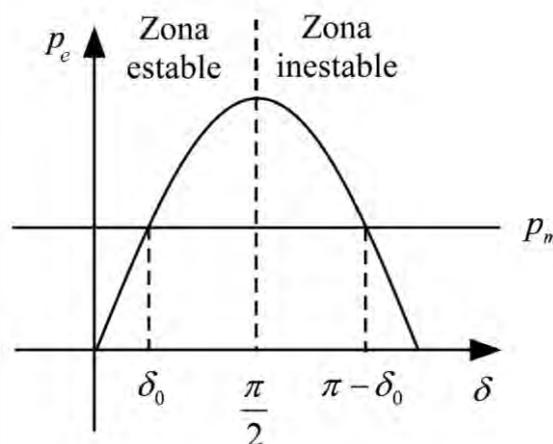
- **Relé de mínima impedancia reactiva:** utiliza una característica de protección de mínima impedancia basada en los valores de la reactancia transitoria ( $X'd$ ) y la reactancia síncrona ( $X_d$ ) del generador. No se tiene en cuenta la reactancia subtransitoria ( $X''d$ ) ya que la pérdida de excitación no es un defecto que ocurra en regímenes transitorios muy rápidos.



*Ilustración 35. Característica del relé de mínima impedancia reactiva*

#### 4.1.3.2 Protección de pérdida de sincronismo

Se dice que un generador está trabajando a sincronismo cuando el ángulo formado por las corrientes del rotor con las del campo del estator (ángulo de carga) permanece constante. Sin embargo, la máquina puede perder el sincronismo por varios motivos: por una falta en la red, por grandes variaciones de carga, etc. Esta pérdida de sincronismo puede dar lugar al embalamiento de la máquina entre otras consecuencias perjudiciales. Existe un ángulo de carga a partir del cual la máquina pierde el sincronismo, este ángulo es  $\pi - \delta_0$  y se muestra, a continuación, en la **Ilustración 36**. La protección frente a pérdida de sincronismo (68), vigila las oscilaciones de impedancia vista desde los bornes de la máquina.



*Ilustración 36. Curva potencia-ángulo de carga de un generador síncrono*

#### 4.1.3.3 Protección de potencia inversa y de mínima potencia

La protección de potencia inversa (32) y la de mínima potencia (37) se encargan de proteger a la turbina en caso de que se produzca una pérdida del par mecánico suministrado por la misma. En caso de que esto ocurriese, el generador pasaría a trabajar como motor, lo que provocaría una motorización de la turbina que comprimirá el agua y el vapor confinados en ella causando sobrepresiones o subpresiones en zonas no previstas en su diseño. Algunos de los inconvenientes son cavitaciones, sobreesfuerzos y dilataciones en los álabes en turbinas de vapor e incluso explosiones incontroladas en turbinas de gas.

Para evitar los problemas mencionados se utilizan las protecciones 32 y 37. Ambas fijan una potencia mínima que el generador al menos debe suministrar cuando está funcionando en condiciones normales. La diferencia entre ellas radica en que la 32 establece la potencia mínima a partir de la cual el generador pasa a funcionar como motor, mientras que la 37 sitúa esta potencia en el mínimo técnico a partir del cual en una central térmica existe una anomalía en el proceso.

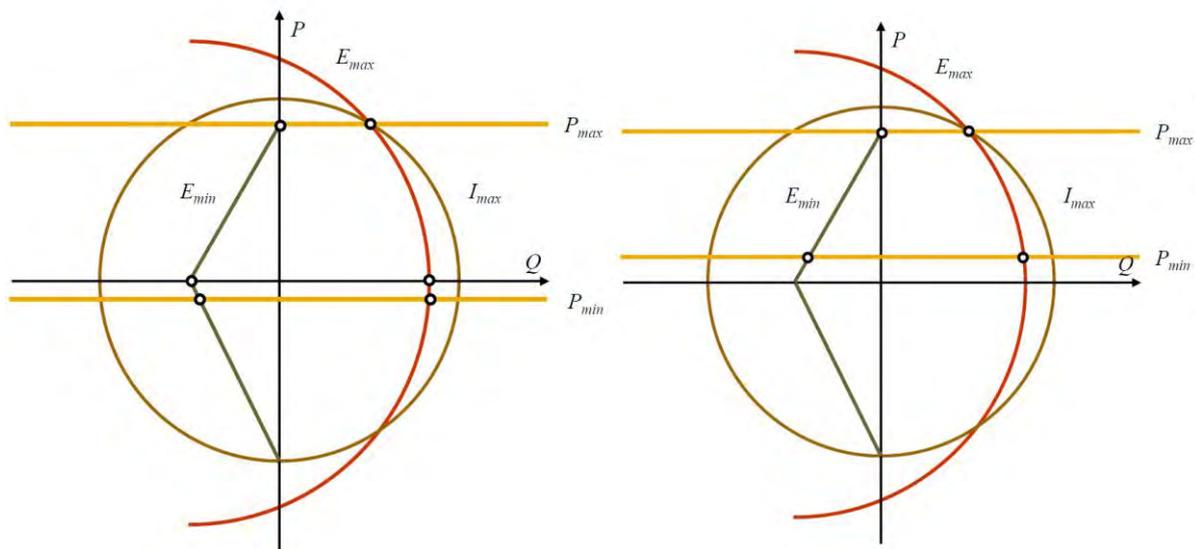


Ilustración 37. Curvas de las protecciones de potencia inversa y de mínima potencia



#### *4.1.3.4 Protección de sobrefrecuencia y de sobrevelocidad*

Esta protección vigila la frecuencia de las tensiones en bornes del generador. La frecuencia está determinada por la velocidad de giro de la máquina y a su vez ésta se ve afectada por la variación del par motor y el par resistente. La protección de sobrefrecuencia (81) protege al generador frente a picos o variaciones en los pares cuando el grupo está acoplado a la red. Se ajusta típicamente a 52 Hz con una temporización de 2-3 segundos.

Cuando en generador no está acoplado a la red, la encargada de actuar es la protección de sobrevelocidad (12). La 12 actúa como respaldo de la 81 y se ajusta al 110% de la velocidad nominal de la máquina con una temporización de 200 ms.

#### *4.1.3.5 Protección de energización accidental*

La energización accidental se produce cuando el interruptor de grupo se cierra accidentalmente estando el generador parado. La energización accidental provoca que la máquina arranque como máquina asíncrona. Sin embargo, al ser la inercia de la máquina síncrona tan elevada el arranque es inviable, lo que provoca que se generen unas corrientes y pares muy elevados.

Para evitar esta situación, el cierre del interruptor se bloquea siempre que el generador esté parado o cuando el interruptor de campo está abierto.

## ***4.2 EQUIPOS DE PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR PRINCIPAL***

---

### **4.2.1 Protecciones propias del transformador principal**

Son ajenas a los defectos de tipo eléctrico.



#### *4.2.1.1 Protecciones de monitorización de temperatura*

Controlar en todo momento la temperatura en el transformador es vital si se quiere alargar la vida de los aislamientos. Altas temperaturas pueden ser la causa de fallos de aislamiento o incluso incendios. Por ello se utilizan elementos de control como termómetros, termostatos e imágenes térmicas para monitorizar la temperatura del equipo, esta protección de monitorización de temperatura es la número 26.

#### *4.2.1.2 Indicador de nivel de aceite*

Su utilidad es controlar el nivel de aceite de los transformadores. Se instalan en los depósitos y dan una alarma cuando el nivel de aceite es lo suficientemente bajo como para que dificulte el buen funcionamiento del transformador. El indicador de nivel de aceite es la protección número 63M.

#### *4.2.1.3 Liberador de presión*

Su instalación es similar a la del indicador de nivel de aceite. El liberador de presión (protección 63L) se coloca en la parte superior del depósito de aceite y permite la liberación de los gases generados cuando la presión que se alcanza en el interior del depósito es comprometida.

#### *4.2.1.4 Protecciones de flujo de gas*

En caso de que se produzca una falta en el interior de un transformador, se puede llegar a generar gas ya sea por calentamiento del aceite o combustión del material aislante. Los relés Buchholz (63B) y Buchholz-Jansen (63BJ) son capaces de detectar variaciones en los volúmenes de gas y controlan las alarmas o el desprendimiento de los gases al exterior dependiendo de la gravedad del caso.

### **4.2.2 Protecciones eléctricas del transformador principal**

Protegen al transformador ante defectos eléctricos y/o térmicos

#### 4.2.2.1 Protección diferencial

Se trata de la protección número 87T. Consta de un relé por fase y solo actúa en caso de faltas internas, es decir, cuando la suma de  $I_1'$  y de  $I_2'$  medida por la bobina diferencial es distinta de cero. El esquema de la protección y su curva característica son los que se mostraron en la **Ilustración 10**. El funcionamiento del relé diferencial viene explicado en detalle en el apartado **2.1.2. Relés según la magnitud de medida**.

#### 4.2.2.2 Protección de sobreintensidad

Las características de actuación de los distintos relés de sobreintensidad vienen descritas en el apartado **2.1.1 Relés según el tiempo de actuación**. Al igual que en la protección diferencial, el relé de sobreintensidad viene explicado en detalle en el apartado **2.1.2. Relés según la magnitud de medida**.

#### 4.2.2.3 Protección de tierra restringida

Detecta faltas internas a tierra en arrollamientos en estrella y vigila la corriente diferencial entre la suma de las intensidades de línea y la intensidad de neutro. Para su correcto funcionamiento debe utilizar transformadores de intensidad de la misma relación tanto en las fases como en el neutro. Se ajusta para una actuación instantánea.

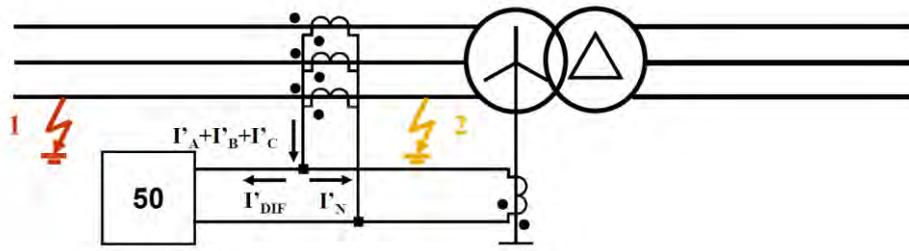
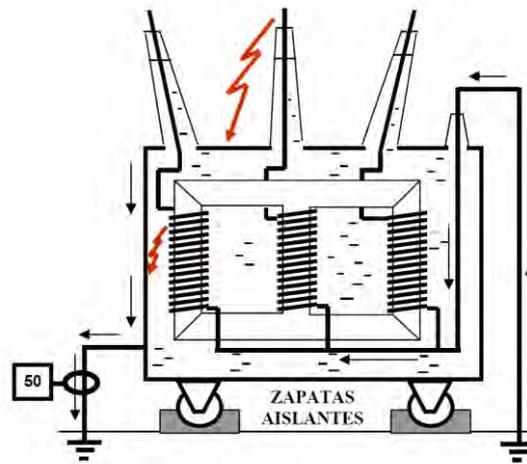


Ilustración 38. Esquema de la protección de tierra restringida

#### 4.2.2.4 Protección de cuba

Detecta defectos de los arrollamientos a la cuba del transformador mediante el calentamiento de los bornes pasatapas. Los daños van desde esfuerzos mecánicos en los arrollamientos hasta daños en las chapas o en la cuba. Para evitarlos, se coloca un transformador de intensidad

toroidal en la conexión a tierra de la cuba en cuyo secundario se instala un relé de sobreintensidad instantáneo.



*Ilustración 39. Instalación de la protección de cuba*

#### *4.2.2.5 Protección de sobrecarga*

Se trata de la protección número 49. Detecta sobrecargas térmicas inadmisibles en los arrollamientos debido a intensidades superiores a la nominal. Como se ha comentado anteriormente, las sobrecargas producen el envejecimiento de los aislamientos de los arrollamientos, que los hace más vulnerables a las sobretensiones. Los relés de esta protección son los encargados de vigilar la temperatura de los devanados del transformador. Al igual que en la protección de sobrecarga del generador, hay tres tipos de relés: las sondas de temperatura, los relés de imagen térmica y los relés digitales de sobrecarga térmica. Todos ellos se explican en detalle en el apartado **4.1.2.1 Protección contra sobrecarga del estator**.

#### *4.2.2.6 Protección de sobresaturación*

Vigila la tensión y frecuencia a partir de la medida de tensión. Si el flujo por las espiras supera el nominal, se produce sobretensión y subfrecuencia. Esto provoca la saturación de las chapas del circuito magnético con el consecuente calentamiento de las chapas y el aumento de las pérdidas en el hierro del transformador. Esta protección está temporizada con característica de tiempo inverso



## Capítulo 5 ESTUDIO DE FALTAS

En este capítulo se realiza un estudio de los distintos tipos de faltas que pueden ocurrir en el sistema eléctrico en el que está incluido el grupo generador que se quiere estudiar y los distintos lugares del sistema en los que pueden darse. Además, se analizan las aportaciones de cada nudo a los distintos defectos que pueden darse.

La principal división que se ha elegido ha sido una división de los distintos lugares en los que puede ocurrir la falta (zona red, zona generador, zona fábricas más servicios auxiliares) y, dentro de cada una de ellos se analizan los distintos tipos de defectos y aportaciones del resto de nudos.

### 5.1 FALTAS EN EL NUDO RED

---

Una vez realizado el estudio de faltas con el software PSS/E se obtiene que, para el sistema eléctrico del grupo generador que se estudia en este proyecto, el nudo en el que se producen las faltas más perjudiciales (debido a su magnitud) es el nudo de la red de 220kV de potencia infinita.

En la siguiente tabla se recoge un resumen de la magnitud de los distintos tipos de defectos que se dan en la zona que hay entre la red de 220kV de potencia infinita y el transformador principal de 500MVA, es decir, la zona 2 (Red) según el esquema eléctrico de la C.T.C.C. de Tarragona que se muestra en la **Ilustración 16**. (Todos los contactos a tierra se suponen directos).



TIPO DE FALTA	MAGNITUD DE LA FALTA
Trifásica	15,0851 (-89,83°) p.u.
Monofásica a tierra	16,0454 (-89,88°) p.u.
Bifásica a tierra	17,1362 (90,06°) p.u.
Bifásica	13,0641 (-179,83°) p.u.

*Tabla 2. Resumen de faltas en el nudo 2, Red*

A continuación, se estudian las aportaciones de cada nudo a la zona de la red para cada una de las distintas faltas (en rojo las fases afectadas y los nudos donde se produce la falta):

- **Falta trifásica:** 15,0851 (-89,83°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
$I_a = I_b = I_c$	3,18 (-105°) p.u.	12,14 (-93°) p.u.	0,01 (-76°) p.u.	0,17 (5°) p.u.

*Tabla 3. Aportes a falta trifásica en la red*

- **Falta monofásica a tierra:** 16,0454 (-89,88°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
$I_a$	2,46 (-76°) p.u.	12,38 (-93°) p.u.	0,02 (-90°) p.u.	0,19 (3°) p.u.
$I_b$	1,72 (119°) p.u.	1,03 (63°) p.u.	0,02 (161°) p.u.	0,25 (-113°) p.u.
$I_c$	0,91 (75°) p.u.	0,11 (-18°) p.u.	0,02 (47°) p.u.	0,24 (113°) p.u.

*Tabla 4. Aportes a falta monofásica a tierra en la red*



- **Falta bifásica a tierra:** 17,1362 (90,06°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
Ia	1,74 (-118°) p.u.	0,68 (-146°) p.u.	0,02 (-67°) p.u.	0,23 (1°) p.u.
Ib	2,39 (162°) p.u.	12,28 (146°) p.u.	0,02 (160°) p.u.	0,18 (-124°) p.u.
Ic	3,18 (15°) p.u.	12,26 (28°) p.u.	0,02 (31°) p.u.	0,19 (132°) p.u.

Tabla 5. Aportes a falta bifásica a tierra en la red

- **Falta bifásica:** 13,0641 (-179,83°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
Ia	0,99 (-142°) p.u.	0,59 (158°) p.u.	0,02 (-63°) p.u.	0,26 (0°) p.u.
Ib	2,31 (-175°) p.u.	10,24 (178°) p.u.	0,02 (158°)	0,19 (-130°) p.u.
Ic	3,18 (15°) p.u.	10,8 (-3°) p.u.	0,02 (24°) p.u.	0,2 (135°) p.u.

Tabla 6. Aportes a falta bifásica en la red

## 5.2 FALTAS EN EL NUDO GRUPO GENERADOR

Como faltas en el nudo generador se entienden todas las que se produzcan entre el grupo que se pretende proteger, el transformador principal y el transformador secundario. En la siguiente tabla se recoge un resumen de la magnitud de los distintos tipos de defectos que se dan en esta zona, la zona 1 (Generador) según el esquema eléctrico de la C.T.C.C. de Tarragona que se muestra en la **Ilustración 16**. (Todos los contactos a tierra se suponen directos).



TIPO DE FALTA	MAGNITUD DE LA FALTA
Trifásica	10,3180 (-112,66°) p.u.
Monofásica a tierra	0,0006 (-24,64°) p.u.
Bifásica a tierra	0,0003 (155,36°) p.u.
Bifásica	8,9357 (-157,34°) p.u.

*Tabla 7. Resumen de faltas en el nudo 1, Generador*

A continuación, se estudian las aportaciones de cada nudo a la zona del grupo generador para cada una de las distintas faltas (en rojo las fases afectadas y los nudos donde se produce la falta):

- **Falta trifásica:** 10,3180 (-112,66°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
$I_a = I_b = I_c$	6,62 (-107°) p.u.	3,61 (-93°) p.u.	0 p.u.	0,02 (171°) p.u.

*Tabla 8. Aportes a falta trifásica en el generador*

- **Falta monofásica a tierra:** 0,0006 (-24,64°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
$I_a$	0,91 (-45°) p.u.	0,59 (158°) p.u.	0,02 (-82°) p.u.	0,26 (0°) p.u.
$I_b$	0,91 (-164°) p.u.	0,59 (39°) p.u.	0,02 (158°) p.u.	0,26 (-120°) p.u.
$I_c$	0,91 (75°) p.u.	0,59 (-81°) p.u.	0,02 (38°) p.u.	0,26 (120°) p.u.



Tabla 9. Aportes a falta monofásica a tierra en el generador

- **Falta bifásica a tierra:** 0,0003 (155,36°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
Ia	0,91 (-45°) p.u.	1,33 (-25°) p.u.	0,02 (-52°) p.u.	0,23 (-33°) p.u.
Ib	6,14 (161°) p.u.	3,61 (147°) p.u.	0,02 (128°) p.u.	0,02 (51°) p.u.
Ic	5,33 (-15°) p.u.	2,3 (-37°) p.u.	0 p.u.	0,23 (153°) p.u.

Tabla 10. Aportes a falta bifásica a tierra en el generador

- **Falta bifásica:** 8,9357 (-157,34°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
Ia	0,91 (-44°) p.u.	1,33 (-26°) p.u.	0,02 (-52°) p.u.	0,23 (-33°) p.u.
Ib	6,14 (161°) p.u.	3,61 (147°) p.u.	0,02 (128°) p.u.	0,02 (51°) p.u.
Ic	5,34 (-15°) p.u.	2,3 (-37°) p.u.	0 p.u.	0,23 (153°) p.u.

Tabla 11. Aportes a falta bifásica en el generador

### 5.3 FALTAS EN LOS SERVICIOS AUXILIARES

Dentro de los servicios auxiliares debemos distinguir el nudo 3 y el nudo 4 del esquema eléctrico de la C.T.C.C. de Tarragona que se muestra en la **Ilustración 16**.



- **Nudo 3. Fábricas y calderas:** en la siguiente tabla se recoge un resumen de la magnitud de los distintos tipos de defectos que se dan en esta zona, que va desde el transformador principal hasta los consumos de las dos fábricas y las calderas de la central térmica.

TIPO DE FALTA	MAGNITUD DE LA FALTA
Trifásica	1,9054 (-82,02°) p.u.
Monofásica a tierra	2,0641 (-84,25°) p.u.
Bifásica a tierra	2,2472 (93,11°) p.u.
Bifásica	1,6501 (-172,02°) p.u.

Tabla 12. Resumen de faltas en el nudo 3, Fábricas y calderas

A continuación, se estudian las aportaciones de cada nudo a la zona de fábricas y calderas para cada una de las distintas faltas (en rojo las fases afectadas y los nudos donde se produce la falta):

- **Falta trifásica:** 1,9054 (-82,02°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
$I_a = I_b = I_c$	1,78 (-91°) p.u.	0,69 (-143°) p.u.	0,02 (-80°) p.u.	0 p.u.

Tabla 13. Aportes a falta trifásica en las fábricas y calderas

- **Falta monofásica a tierra:** 2,0641 (-84,25°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
----------------	---------------	---------	-------------------	--------------



Ia	1,59 (-68°) p.u.	0,6 (-163°) p.u.	0,02 (-86°) p.u.	0,1 (-2°) p.u.
Ib	1,02 (-145°) p.u.	0,81 (55°) p.u.	0,02 (159°) p.u.	0,21 (-100°) p.u.
Ic	0,91 (75°) p.u.	0,3 (-72°) p.u.	0,02 (42°) p.u.	0,22 (105°) p.u.

Tabla 14. Aportes a falta monofásica a tierra en las fábricas y calderas

- **Falta bifásica a tierra: 2,2472 (93,11°) p.u.**

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
Ia	1,09 (-93°) p.u.	0,58 (-169°) p.u.	0,02 (-77°) p.u.	0,16 (3°) p.u.
Ib	1,51 (171°) p.u.	0,42 (99°) p.u.	0,02 (159°) p.u.	0,08 (-177°) p.u.
Ic	1,78 (29°) p.u.	0,84 (-40°) p.u.	0,02 (35°) p.u.	0,08 (-177°) p.u.

Tabla 15. Aportes a falta bifásica a tierra en las fábricas y calderas

- **Falta bifásica: 1,6501 (-172,02°) p.u.**

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
Ia	0,64 (-92°) p.u.	0,58 (158°) p.u.	0,02 (-75°) p.u.	0,13 (0°) p.u.
Ib	1,55 (-171°) p.u.	0,38 (102°) p.u.	0,02 (158°) p.u.	0,13 (-120°) p.u.
Ic	1,78 (29°) p.u.	0,86 (-43°) p.u.	0,02 (33°) p.u.	0,13 (120°) p.u.

Tabla 16. Aportes a falta bifásica en las fábricas y calderas



- **Nudo 4. Servicios auxiliares de la central:** en la siguiente tabla se recoge un resumen de la magnitud de los distintos tipos de defectos que se dan en esta zona, que va desde el transformador secundario hasta el consumo de los servicios auxiliares de la central térmica

TIPO DE FALTA	MAGNITUD DE LA FALTA
Trifásica	0,8219 (-144,35°) p.u.
Monofásica a tierra	1,2053 (-144,39°) p.u.
Bifásica a tierra	2,2593 (35,50°) p.u.
Bifásica	0,7118 (125,65°) p.u.

Tabla 17. Resumen de faltas en el nudo 4, Servicios auxiliares de la central

A continuación, se estudian las aportaciones de cada nudo a la zona de servicios auxiliares de la central para cada una de las distintas faltas (en rojo las fases afectadas y los nudos donde se produce la falta):

- **Falta trifásica:** 0,8219 (-144,35°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
<b>Ia = Ib = Ic</b>	1,17 (-70°) p.u.	0,54 (-169°) p.u.	0 p.u.	0,24 (0°) p.u.

Tabla 18. Aportes a falta trifásica en los servicios auxiliares de la central

- **Falta monofásica a tierra:** 1,2053 (-144,39°) p.u.

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	S. Auxiliares (4)	Fábricas (3)
----------------	---------------	---------	-------------------	--------------



<b>Ia</b>	0,91 (-73°) p.u.	0,69 (169°) p.u.	0,01 (-82°) p.u.	0,26 (2°) p.u.
<b>Ib</b>	0,91 (-165°) p.u.	0,44 (41°) p.u.	0,01 (160°) p.u.	0,26 (-122°) p.u.
<b>Ic</b>	1,26 (61°) p.u.	0,54 (-50°) p.u.	0,01 (36°) p.u.	0,24 (120°) p.u.

*Tabla 19. Aportes a falta monofásica a tierra en los servicios auxiliares de la central*

- **Falta bifásica a tierra: 2,2593 (35,50°) p.u.**

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	<b>S. Auxiliares (4)</b>	Fábricas (3)
<b>Ia</b>	1,16 (-68°) p.u.	0,53 (-170°) p.u.	0,01 (-80°) p.u.	0,24 (0°) p.u.
<b>Ib</b>	1,17 (170°) p.u.	0,55 (70°) p.u.	0,01 (100°) p.u.	0,24 (-119°) p.u.
<b>Ic</b>	1,13 (51°) p.u.	0,54 (-52°) p.u.	0,01 (100°) p.u.	0,24 (120°) p.u.

*Tabla 20. Aportes a falta bifásica a tierra en los servicios auxiliares de la central*

- **Falta bifásica: 0,7118 (125,65°) p.u.**

NUDO DE APORTE	Generador (1)	Red (2)	<b>S. Auxiliares (4)</b>	Fábricas (3)
<b>Ia</b>	1,16 (-48°) p.u.	0,40 (-178°) p.u.	0,01 (-82°) p.u.	0,25 (-2°) p.u.
<b>Ib</b>	1,17 (170°) p.u.	0,68 (63°) p.u.	0,01 (158°) p.u.	0,25 (-117°) p.u.
<b>Ic</b>	0,75 (61°) p.u.	0,59 (-81°) p.u.	0,01 (38°) p.u.	0,26 (120°) p.u.

*Tabla 21. Aportes a falta bifásica en los servicios auxiliares de la central*



---

## Capítulo 6 COORDINACIÓN DE LAS PROTECCIONES

En este capítulo se realizan ajustes de diversas protecciones para paliar los efectos de tres tipos de incidencias que pueden ocurrir en un grupo generador.

### 6.1 COORDINACIÓN ANTE SOBRECORRIENTE DE NEUTRO/FASE

---

En este primer caso se estudia el defecto de la sobreintensidad bien sea en las tres fases o en el neutro del sistema eléctrico de la C.T.C.C de Tarragona. En primera instancia hay que analizar cómo son los defectos que producen sobrecorrientes que, obviamente, son los distintos tipos de faltas o cortocircuitos eléctricos que se pueden producir en las distintas partes del sistema.

- **Sobrecorrientes de fase:** son las que circulan por las fases del sistema y se deben a faltas trifásicas o bifásicas. Para prevenirlas se realiza el ajuste coordinado de tres tipos de protecciones:
  - **Protección diferencial del transformador (87T), protección diferencial del generador (87G) y protección diferencial de bloque (87TG):** el funcionamiento de la protección diferencial ha sido explicado en detalle en el apartado 2.1.2 **Relés según la magnitud de medida**. Las dos del generador tendrán el mismo ajuste que, será ligeramente distinto a la del transformador.

Las tres se ajustarán con una intensidad diferencial de arranque típica de 0,2 p.u. y con unas pendientes de aproximadamente un 25%. No obstante, la máxima intensidad de falta pasante por la zona del generador (6,62 p.u. en caso de falta trifásica en el lado del generador) no es la misma que la de la zona de



la red (12,14 p.u. en caso de falta trifásica en el lado de la red), además habrá que tener en cuenta la intensidad nominal del grupo a la hora de elegir los transformadores de intensidad adecuados para ajustar la actuación de la protección con la curva deseada (la protección diferencial nunca verá faltas externas a su intervalo de actuación). La curva de actuación que aparece en la **Ilustración 10** es un ejemplo de una protección diferencial para el generador y el transformador que se estudian.

- **Protección de sobreintensidad del transformador (50T y 51T):** para ajustar la unidad de tiempo definido (50), se selecciona un valor de 1,5 veces la intensidad de falta más pequeña que circula por el transformador en caso de la falta entre fases más dañina (en este caso una falta trifásica en la red que da un aporte de 3,18 p.u. del generador) con una temporización de 100 ms (debe admitir capacidad de sobrecarga del transformador y la corriente de energización). Se ajusta por tanto a un valor de 4,77 p.u. Si se consideran la mayor y menor intensidad que aporta la red al transformador en caso de falta trifásica el 0% y el 100% del transformador (12,14 p.u. y 3,61 p.u. respectivamente según la **Tabla 3** y la **Tabla 8**), con un ajuste a 4,77 p.u. e interpolando se cubre el 86,4% del transformador con la unidad de tiempo definido. El resto se cubre con la unidad de tiempo inverso.

Para ajustar la unidad de tiempo inverso (51), se selecciona una intensidad de arranque del 120% de la intensidad nominal del generador (el transformador aguanta una sobrecarga del 25%). Hay que asegurarse que este valor de intensidad de arranque sea mayor que la intensidad nominal del transformador para evitar actuaciones no deseadas (en este caso  $17,06\text{kA} > 15,19\text{kA} \rightarrow$  Ajuste válido). La curva se ajusta con una característica inversa con un dial de  $T = 0,098$  segundos según la expresión normalizada comentada en el apartado **2.1.1 Relés según el tiempo de actuación** y queda según se muestra a continuación:

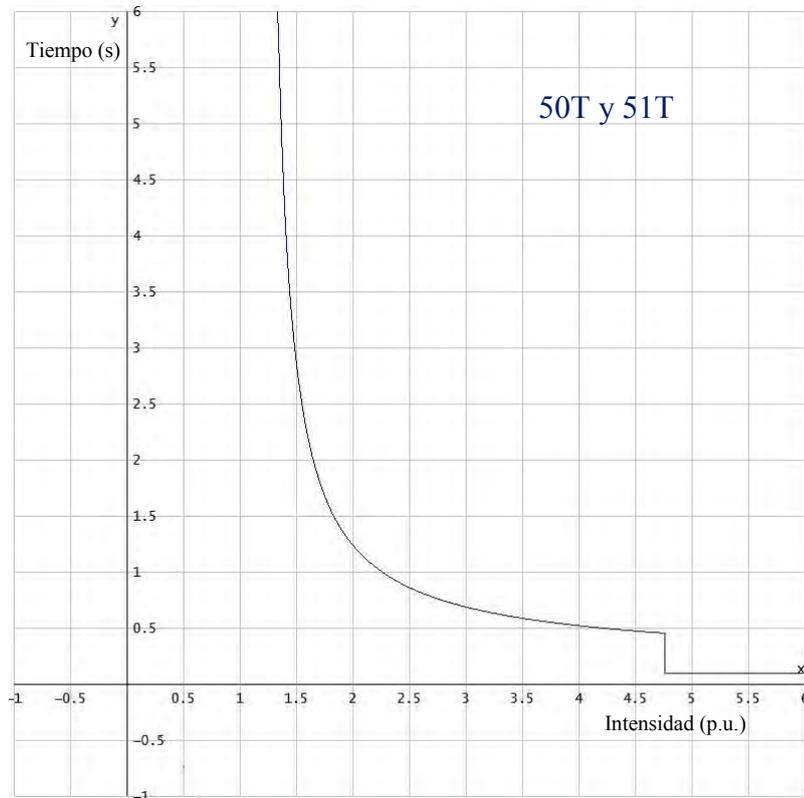


Ilustración 40. Ajuste de la curva de protección de sobrecorriente del transformador

- **Protección de sobrecorriente del generador (51G):** en el generador solamente se instala la unidad de tiempo inverso. Se selecciona una intensidad de arranque del 120% de la intensidad nominal del generador (igual que la 51T) pero con un retraso de 250 ms respecto a esta y haciendo coincidir la intensidad de falta más pequeña que circula por el generador en caso de la falta más dañina (3,18 p.u.) con un tiempo de actuación de 1 segundo. Con estas especificaciones se obtiene una curva con una característica inversa y con un dial de  $T = 0,151$  segundos según la expresión normalizada comentada en el apartado **2.1.1 Relés según el tiempo de actuación**. A continuación se muestran las curvas de protección de sobrecorriente del transformador y del generador en una misma ilustración:

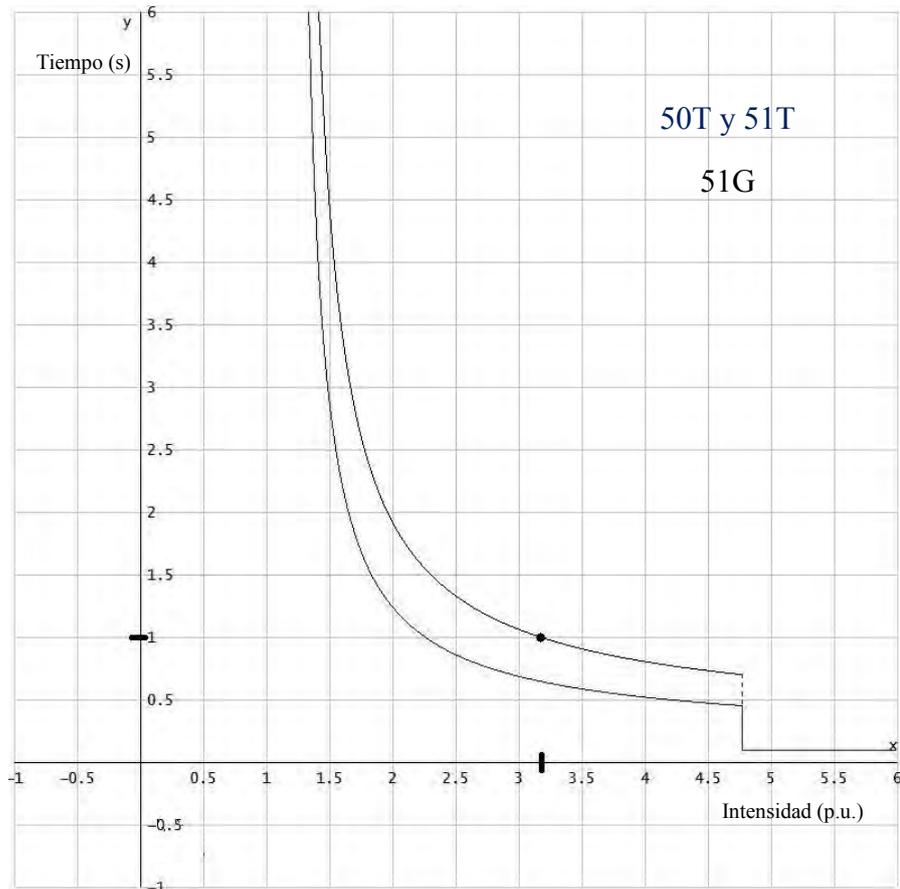


Ilustración 41. Ajuste de las curvas de protección de sobrecorriente del transformador y del generador

- **Sobrecorrientes de neutro:** son las que circulan el neutro del sistema y se deben a faltas monofásicas principalmente. Para prevenirlas se realiza el ajuste coordinado de los dos tipos principales de protecciones para este caso:
  - **Protección a tierra en el estator (64G):** lo principal es ajustar el relé de máxima intensidad de neutro que vigila la intensidad que circula por el generador a tierra cuando se produce una falta. La intensidad está limitada por la resistencia del secundario del transformador de puesta a tierra del generador (**Ilustración 15**). Su valor de 0,496 ohm, 443A, limita la intensidad que circula por el generador exactamente a 8,86A por lo que un buen valor de ajuste para la 64G serían  $10^3$ , una intensidad más que soportable para el generador.

- **Protección de sobreintensidad de neutro del transformador (51n):** el ajuste típico de esta protección es una intensidad de arranque del 20% de la nominal del transformador y un ajuste de 1 segundo para una intensidad el 400% (4 p.u.) de la nominal del transformador. Con estas especificaciones surge un problema, la curva de la 51n se cruza con la 51T y la 51G en la zona de altas intensidades. Esto hay que evitarlo siempre que sea posible ya que cada protección se debe diseñar para poder cumplir por sí misma la misión para la que ha sido pensada (otras no deben suplirla). Por tanto se ajusta con una característica inversa, con una intensidad de arranque de 0,2 p.u. y con un dial de  $T = 0,248$  segundos según la expresión normalizada comentada en el apartado **2.1.1 Relés según el tiempo de actuación**. A continuación se muestran las curvas de protección de sobreintensidad del transformador y del generador junto con la de neutro del transformador en una misma ilustración:

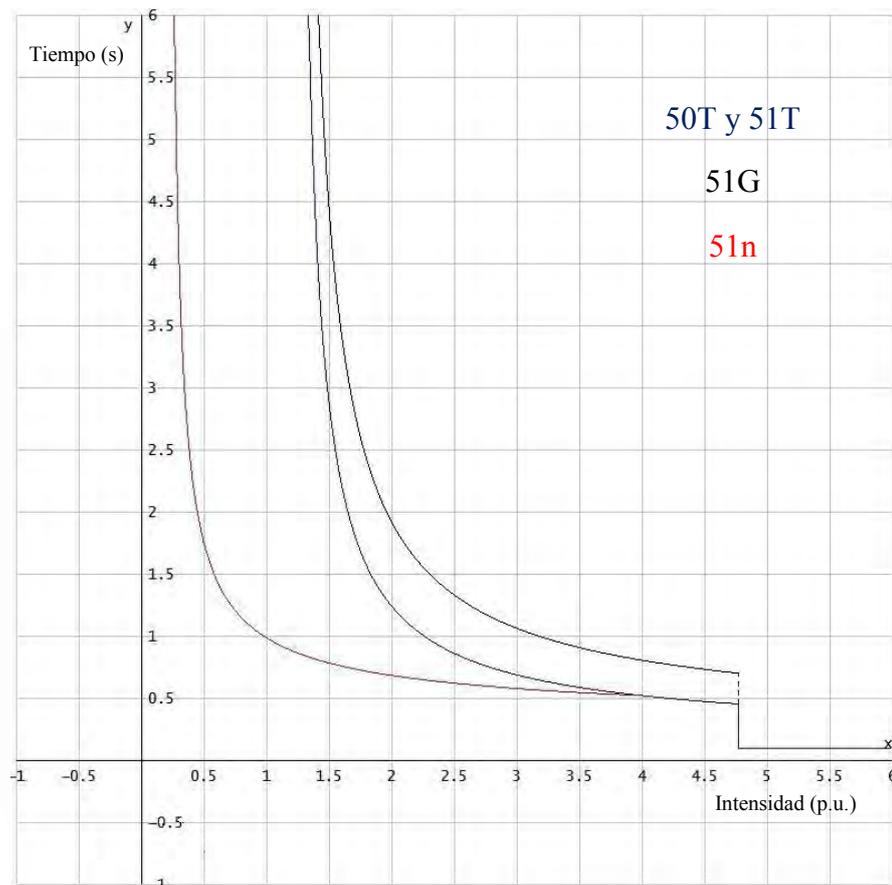


Ilustración 42. Ajuste de las curvas de protección 50T, 51T, 51G y 51n



## 6.2 COORDINACIÓN ANTE DESEQUILIBRIO DE FASES

En este segundo caso se estudia el defecto del desequilibrio de fases que principalmente está causado por la secuencia inversa en el generador. Esta incidencia tiene sus causas en faltas bifásicas, apertura de fases, desequilibrio de cargas, desequilibrios constructivos en los devanados del estator, etc., tal y como se ha explicado en el apartado **4.1.2.3 Protección de secuencia inversa**.

La protección encargada de proteger al generador de los efectos negativos del desequilibrio de fases es la protección de secuencia inversa (46G) y su función es proteger al rotor de los calentamientos provocados por la circulación de corrientes de secuencia negativa que producen vibraciones indeseadas en la turbina y en el eje y calentamientos en el devanado del rotor y en sus chapas magnéticas. Es una función de protección trifásica de operación de tiempo inverso según la siguiente ecuación:

$$t = \frac{K_1}{\left(\frac{I_2}{I_N}\right)^2 - K_2^2}$$

Siendo:

- $t$  el tiempo de disparo.
- $I_2$  la intensidad de secuencia negativa.
- $K_1$  la máxima energía de secuencia negativa permisible ( $I_2^2 * t$ ). Se ajusta a un valor de 30.
- $K_2$  la intensidad de secuencia negativa permisible en régimen permanente. Se ajusta a 0,12 p.u.
- $I_N$  la intensidad nominal del generador, 14,22kA.

La curva característica de la protección es la que sigue:

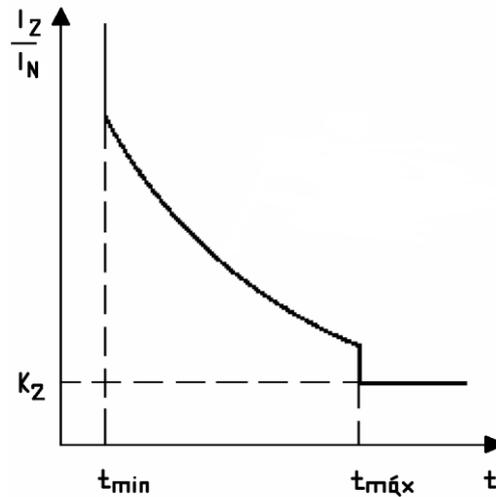


Ilustración 43. Ajuste de la característica de la protección de secuencia inversa

Se ajusta  $T_{min}$  a 10 segundos (ajuste típico  $<30$  segundos) y  $T_{máx}$  a 30 minutos. La protección de secuencia inversa mide la intensidad de línea integrando la energía disipada en los devanados y vigila que no se superen los valores de su curva característica.

### 6.3 COORDINACIÓN ANTE MÍNIMA IMPEDANCIA

Tal y como ha sido explicado en el apartado **4.1.1.3 Protecciones contra defectos entre fases**, el objeto de la protección de mínima impedancia, o de distancia (21), es desconectar rápida y selectivamente las faltas de líneas, haciendo que el tiempo de disparo dependa de la dirección y distancia del punto de localización de la falta.

El ajuste típico de primera zona es proteger el embarrado de generación completo y el 40% del transformador con disparo instantáneo ( $t \approx 0$  segundos) y hasta el 80% del embarrado del transformador con un ajuste de tiempo de 200 ms. El ajuste de la segunda zona se realiza hasta el 20% de las líneas adyacentes con una temporización de 1 segundo, en este caso se desconocen los valores de las impedancias de las líneas adyacentes por lo que solo se hará el

ajuste de la primera zona. Al ser la impedancia prácticamente inductiva, la característica de la protección que da como se muestra a continuación:

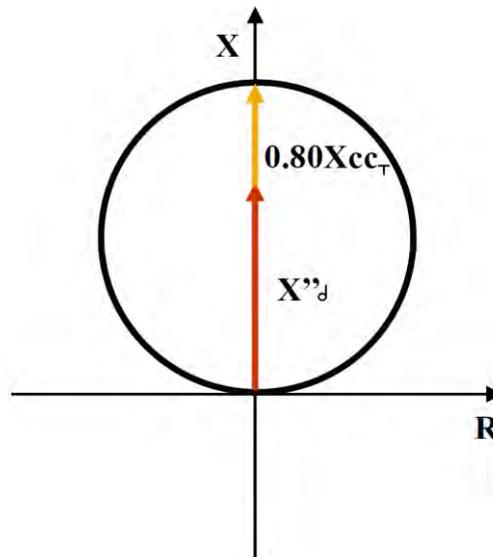


Ilustración 44. Ajuste de la primera zona de la protección de mínima impedancia

Siendo:

- $0,80 * X_{cc\ trafo} = 0,80 * 0,187 = 0,15j\ p.u.$  De entre las 3 impedancias de cortocircuito del transformador, se usa la que está entre la red de potencia infinita de 220kV y entre el generador (19kV) ya que es entre los que se producen las magnitudes más dañinas en caso de faltas.
- $X''_d = 0,16j\ p.u.$  la impedancia subtransitoria del generador con la que se asegura la completa protección del devanado del mismo por parte de la protección de distancia en caso de cortocircuito.



## **Capítulo 7 CONCLUSIONES**

Una vez realizada la explicación de las protecciones imprescindibles para el sistema de generación de la central térmica, el análisis de faltas en el sistema y el ajuste de algunas de las principales protecciones se pueden sacar algunas conclusiones:

- Se ha realizado en todo momento una división lógica en cuanto a tipos de relés, tipos de faltas, zonas del sistema eléctrico, tipos de funciones de protección necesarias, entre otras; que, favorecen un seguimiento más dinámico y una comprensión más intuitiva de los conceptos y resultados.
- Las magnitudes de los equipos, de los ajustes de protecciones y de los resultados se han referido a valores por unidad (p.u.) debido a la facilidad que aporta este sistema a la hora de comparar intensidades de falta que se producen en distintos nudos del sistema.
- Una vez recopilados todos los aportes de las distintas zonas a las faltas que se dan en los distintos nudos del sistema, se llega a la conclusión que la falta más perjudicial es la falta trifásica ya que la intensidad de defecto trifásico es la más grande tanto si se produce la falta en la zona del generador o zona red. En el caso de los servicios auxiliares (y por poco en la zona red) la más perjudicial es la bifásica a tierra, sin embargo no se tiene en cuenta como la más perjudicial debido a su escasa probabilidad de aparición y a que la magnitud depende de cómo sea el contacto a tierra.
- Se han analizado y explicado las principales protecciones que debe poseer el sistema eléctrico de una central de generación para proteger adecuadamente el alternador.



- Las protecciones que no se han ajustado en el **Capítulo 6 Coordinación de las protecciones** se ajustan de acuerdo a los valores típicos y las curvas características de cada protección que aparecen explicadas en el **Capítulo 4 Determinación de las funciones de protección necesarias**.



## Capítulo 8 BIBLIOGRAFÍA

- ABB13. (2013). *ABB Power Technology, S.A. Cálculo de ajustes protecciones eléctricas generador y transformador principal.*
- REE05. (2005). *Red Eléctrica de España, Criterios generales de protección de los sistemas eléctricos insulares y extrapeninsulares.*
- REE14. (2014). *Red Eléctrica de España, Informe Anual de la Evolución de la Potencia de Cortocircuito en la red de transporte del Sistema Eléctrico Peninsular en el año 2013.*
- ROUC14. (2014). *Luis Rouco Rodríguez, Introducción a las protecciones eléctricas.*
- ROUC14. (2014). *Luis Rouco Rodríguez, Protección de generadores.*
- ROUC14. (2014). *Luis Rouco Rodríguez, Protección de transformadores.*
- SCHN99. (1999). *Schneider Electric, Cuaderno técnico nº 158. Cálculo de corrientes de cortocircuito.*

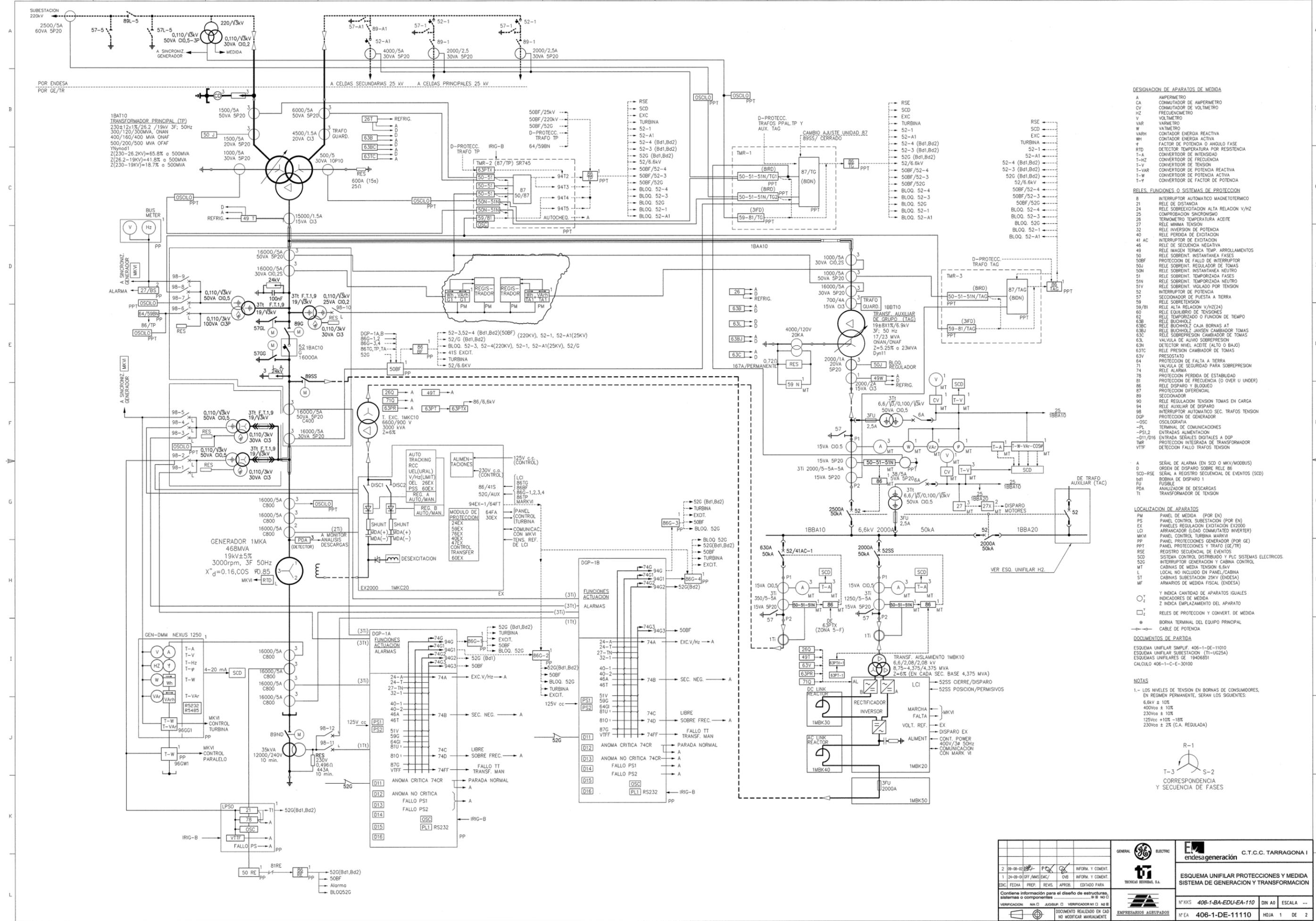


# *Parte II PLANOS*



## **Capítulo 1 PLANOS DE LA C.T.C.C DE TARRAGONA**

A continuación se muestran los dos planos en los que se recogen los aparatos de fuerza, de aparamenta y distintas protecciones de las zonas de red de alta tensión, generación, servicios y plantas auxiliares de la central térmica de ciclo combinado de Tarragona.



**DESIGNACION DE APARATOS DE MEDIDA**

A	AMPERMETRO
CA	COMUTADOR DE AMPERMETRO
CV	COMUTADOR DE VOLTIMETRO
HZ	FRECUENCIOMETRO
V	VOLTIMETRO
VAR	VARIOMETRO
VARH	VARIMETRO
WH	CONTADOR ENERGIA REACTIVA
WHC	CONTADOR ENERGIA ACTIVA
W	FACTOR DE POTENCIA O ANGULO FASE
RTD	DETECTOR TEMPERATURA POR RESISTENCIA
T-A	CONVERTIDOR DE INTENSIDAD
T-HZ	CONVERTIDOR DE FRECUENCIA
T-V	CONVERTIDOR DE TENSION
T-Var	CONVERTIDOR DE POTENCIA REACTIVA
T-W	CONVERTIDOR DE POTENCIA ACTIVA
T-φ	CONVERTIDOR DE FACTOR DE POTENCIA

**RELES, FUNCIONES O SISTEMAS DE PROTECCION**

8	INTERRUPTOR AUTOMATICO MAGNETOTERMICO
21	RELE DE DISTANCIA
24	RELE SOBRECARGA ALTA RELACION V/HZ
25	COMPOSICION SINCRONISMO
26	TERMOMETRO TEMPERATURA ACEITE
27	RELE MINIMA TENSION
32	RELE INVERSION DE POTENCIA
40	RELE PERDIDA DE EXCITACION
41 AC	INTERRUPTOR DE EXCITACION
46	RELE DE SECUENCIA NEGATIVA
49	RELE IMAGEN TERMICA TEMP. ARROLLAMENTOS
50	RELE SOBRIENT. INSTANTANEA FASES
50BF	PROTECCION DE FALLO DE INTERRUPTOR
50J	RELE SOBRIENT. REGULADOR DE TOMAS
50N	RELE SOBRIENT. INSTANTANEA NEUTRO
51	RELE SOBRIENT. TEMPORIZADA FASES
51N	RELE SOBRIENT. TEMPORIZADA NEUTRO
51V	RELE SOBRIENT. VIGILADO POR TENSION
52	INTERRUPTOR DE POTENCIA
52	SECCIONADOR DE PUESTA A TIERRA
52	RELE SOBRETENSION
59/81	RELE ALTA RELACION V/HZ(24)
60	RELE EQUILIBRIO DE TENSIONES
62	RELE TEMPORIZADO O FUNCION DE TIEMPO
63B	RELE BIJUNHOLZ
63BC	RELE BIJUNHOLZ CAJA BORNAS AT
63B1	RELE BIJUNHOLZ JANSSEN CAMBIADOR TOMAS
63C	RELE SOBREPRESION CAMBIADOR DE TOMAS
63L	VALVULA DE ALIVIO SOBREPRESION
63N	DETECTOR NIVEL ACEITE (ALTO O BAJO)
63TC	RELE PRESION CAMBIADOR DE TOMAS
63V	PRESOSTATO
64	PROTECCION DE FALTA A TIERRA
71	VALVULA DE SEGURIDAD PARA SOBREPRESION
74	RELE ALARMA
78	PROTECCION PERDIDA DE ESTABILIDAD
81	PROTECCION DE FRECUENCIA (O OVER U UNDER)
86	RELE DISPARO Y BLOQUEO
87	PROTECCION DIFERENCIAL
89	SECCIONADOR
90	RELE REGULACION TENSION TOMAS EN CARGA
94	RELE AUXILIAR DE DISPARO
98	INTERRUPTOR AUTOMATICO SEC. TRAFOS TENSION
DGP	PROTECCION DE GENERADOR
-OSC	OSCOLOGRAFIA
-PL	TERMINAL DE COMUNICACIONES
-PS1/2	ENTRADAS ALIMENTACION
-D11/D16	ENTRADA SEÑALES DIGITALES A DGP
TMT	PROTECCION INTEGRADA DE TRANSFORMADOR
VTF	DETECCION FALLO TRAFOS TENSION

**LOCALIZACION DE APARATOS**

PM	PANEL DE MEDIDA (POR EN)
PS	PANEL CONTROL SUBSTACION (POR EN)
EX	PANELES REGULACION EXCITACION EX2000
LCI	ARRANCADOR (LOAD COMMUTATED INVERTER)
MKVVI	PANEL CONTROL TURBINA MKVVI
PP	PANEL PROTECCIONES GENERADOR (POR GE)
PPT	PANEL PROTECCIONES Y TRAFOS (GE/TR)
RSE	REGISTRO SECUENCIAL DE EVENTOS
SCD	SISTEMA CONTROL DISTRIBUIDO Y PLC SISTEMAS ELECTRICOS
52G	INTERRUPTOR GENERACION Y CABINA CONTROL
MT	CABINAS DE MEDIA TENSION 6.6kV
L	LOCAL NO INCLUIDO EN PANEL/CABINA
ST	CABINAS SUBSTACION 25kV (ENDESA)
MF	ARMARIOS DE MEDIDA FISCAL (ENDESA)

Y INDICA CANTIDAD DE APARATOS IGUALES  
 INDICADORES DE MEDIDA  
 Z INDICA EMPLAZAMIENTO DEL APARATO  
 RELES DE PROTECCION Y CONVERT. DE MEDIDA  
 BORNA TERMINAL DEL EQUIPO PRINCIPAL  
 CABLE DE POTENCIA

**DOCUMENTOS DE PARTIDA**

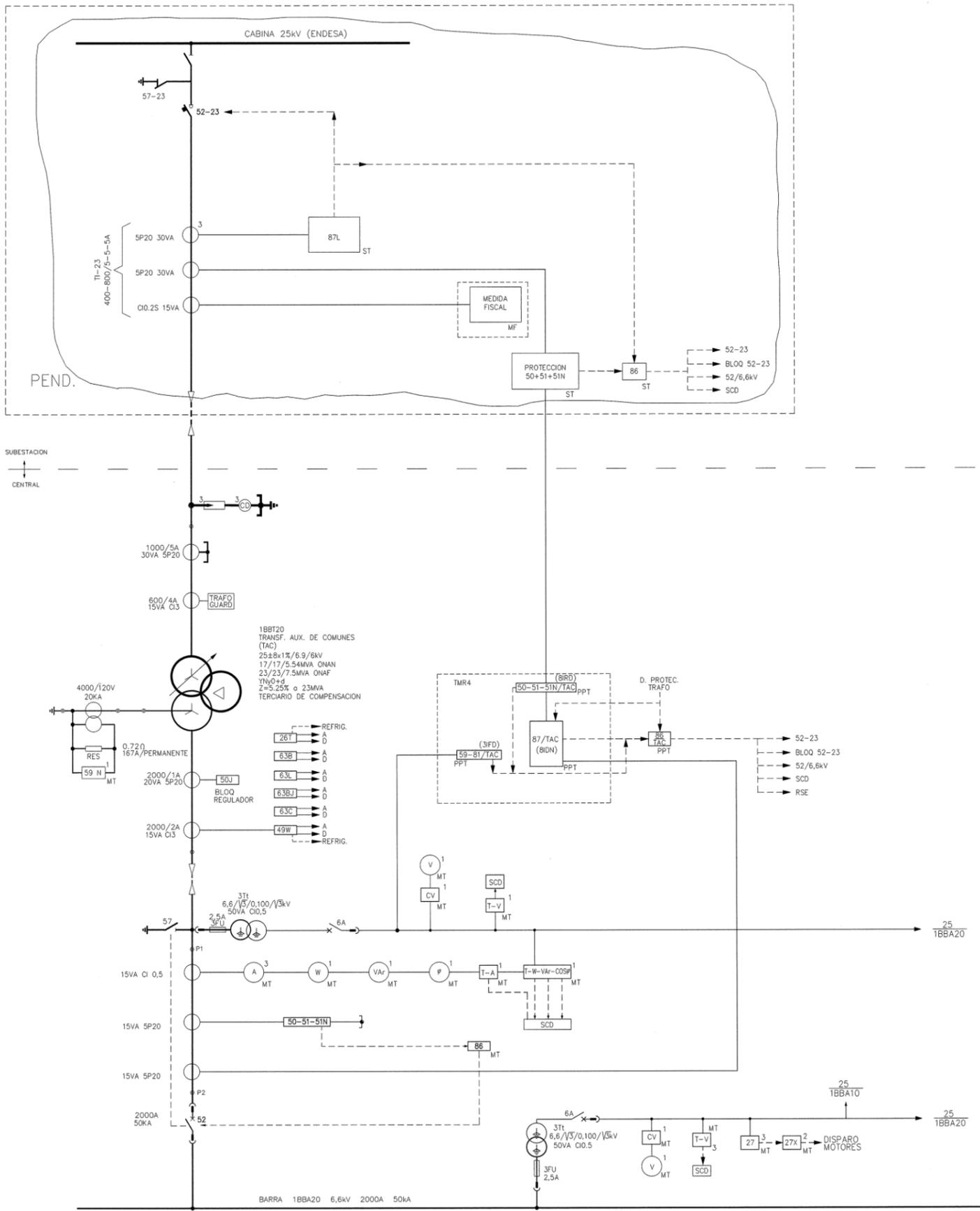
ESQUEMA UNIFILAR SIMPLIF. 406-1-DE-11010  
 ESQUEMA UNIFILAR SUBSTACION (T1-UG25A)  
 ESQUEMAS UNIFILARES DE (B406B51)  
 CALCULO 406-1-C-E-30100

**NOTAS**

1.- LOS NIVELES DE TENSION EN BORNAS DE CONSUMIDORES, EN REGIMEN PERMANENTE, SERAN LOS SIGUIENTES:  
 6.6kV ± 10%  
 400Vcc ± 10%  
 230Vcc ± 10%  
 125Vcc ± 10% - 18%  
 230Vcc ± 2% (C.A. REGULADA)



GENERAL	ENDESA GENERACION	C.T.C.C. TARRAGONA I
2 09-08-01	INFORM. Y COMENT.	
1 24-08-01	INFORM. Y COMENT.	
EDIC. FECHA	PREP. REVIS. APROB. EDITADO PARA	
Contiene informacion para el diseno de estructuras, sistemas o componentes... VERIFICACION: N/A D. JUBILADO. VERIFICACION: N/A D. JUBILADO.		
DOCUMENTO REALIZADO EN CAD NO MODIFICAR MANUALMENTE		
EMPRESA: EMPRESARIOS AGRUPOADOS Nº KKS: 406-1-BA-EDU-EA-110 Nº EA: 406-1-DE-11110		
CON	ADN	ESCALA
HOJA 1 DE 2		



**DESIGNACION DE APARATOS DE MEDIDA**

A	AMPERMETRO
CA	COMUTADOR DE AMPERMETRO
CV	CONVERTIDOR DE VOLTIMETRO
HZ	FRECUENCIOMETRO
V	VOLTIMETRO
VAR	VARMETRO
VARH	CONTEADOR ENERGIA REACTIVA
WH	CONTEADOR ENERGIA ACTIVA
F	FACTOR DE POTENCIA O ANGULO FASE
RTD	DETECTOR TEMPERATURA POR RESISTENCIA
T-A	CONVERTIDOR DE INTENSIDAD
T-HZ	CONVERTIDOR DE FRECUENCIA
T-V	CONVERTIDOR DE TENSION
T-VAR	CONVERTIDOR DE POTENCIA REACTIVA
T-W	CONVERTIDOR DE POTENCIA ACTIVA
T-Y	CONVERTIDOR DE FACTOR DE POTENCIA

**RELES, FUNCIONES O SISTEMAS DE PROTECCION**

8	INTERRUPTOR AUTOMATICO MAGNETOTERMICO
21	RELE DE DISTANCIA
24	RELE SOBRECARGA ALTA RELACION V/HZ
25	COMPROBACION SINCRONISMO
26	TERMOMETRO TEMPERATURA ACEITE
27	RELE MINIMA TENSION
32	RELE INVERSION DE POTENCIA
40	RELE PERDIDA DE EXCITACION
41 AC	INTERRUPTOR DE EXCITACION
46	RELE DE SECUENCIA NEGATIVA
49	RELE MAGEN TERMICA TEMP. ARROLLAMIENTOS
50	RELE SOBREINT. INSTANTANEA FASES
50BF	PROTECCION DE FALLO DE INTERRUPTOR
50J	RELE SOBREINT. REGULADOR DE TOMAS
50N	RELE SOBREINT. INSTANTANEA NEUTRO
51	RELE SOBREINT. TEMPORIZADA FASES
51N	RELE SOBREINT. TEMPORIZADA NEUTRO
51V	RELE SOBREINT. VIOLADO POR TENSION
52	INTERRUPTOR DE POTENCIA
57	SECCIONADOR DE PUESTA A TIERRA
59	RELE SOBRETENSION
59/81	RELE ALTA RELACION V/HZ(24)
60	RELE EQUILIBRIO DE TENSIONES
62	RELE TEMPORIZADO O FUNCION DE TIEMPO
63B	RELE BUCHHOLZ
63BC	RELE BUCHHOLZ CAJA BORNAS AT
63BU	RELE BUCHHOLZ JANSSEN CAMBIADOR TOMAS
63C	RELE SOBREPRESION CAMBIADOR DE TOMAS
63L	VALVULA DE ALIVIO SOBREPRESION
63M	DETECTOR NIVEL ACEITE (ALTO O BAJO)
63TC	RELE PRESION CAMBIADOR DE TOMAS
63V	PRESTOSTATO
64	PROTECCION DE FALTA A TIERRA
71	VALVULA DE SEGURIDAD PARA SOBREPRESION
74	RELE ALARMA
78	PROTECCION PERDIDA DE ESTABILIDAD
81	PROTECCION DE FRECUENCIA (O OVER U UNDER)
86	RELE DISPARO Y BLOQUEO
87	PROTECCION DIFERENCIAL
89	SECCIONADOR
90	RELE REGULACION TENSION TOMAS EN CARGA
94	RELE AUXILIAR DE DISPARO
98	INTERRUPTOR AUTOMATICO SEC. TRAFOS TENSION
DGP	PROTECCION DE GENERADOR
-DSC	OSCUROGRAFIA
-PL	TERMINAL DE COMUNICACIONES
-PS1,2	ENTRADAS ALIMENTACION
-D11/D16	ENTRADA SEÑALES DIGITALES A DGP
TMR	PROTECCION INTEGRADA DE TRANSFORMADOR
VTF	DETECCION FALLO TRAFOS TENSION

**LOCALIZACION DE APARATOS**

A	SEÑAL DE ALARMA (EN SCD O MKV/MODBUS)
D	ORDEN DE DISPARO SOBRE RELE 86
SCD-RSE	SEÑAL A REGISTRO SECUENCIAL DE EVENTOS (SCD)
bdi	BORNA DE DISPARO 1
FU	FUSIBLE
POA	ANALIZADOR DE DESCARGAS
TI	TRANSFORMADOR DE TENSION

**NOTAS**

1.- LOS NIVELES DE TENSION EN BORNAS DE CONSUMIDORES, EN REGIMEN PERMANENTE, SERAN LOS SIGUIENTES:

- 6.6kV ± 10%
- 400vca ± 10%
- 230vca ± 10%
- 125vcc +10% -18%
- 230vca ± 2% (C.A. REGULADA)

**DOCUMENTOS DE PARTIDA**

ESQUEMA UNIFILAR SIMPLIF. 406-1-DE-11010  
 ESQUEMA UNIFILAR SUBESTACION (T1-U025A)  
 ESQUEMAS UNIFILARES GE 19406851  
 CALCULO 406-1-C-E-30100

**NOTAS**

1.- LOS NIVELES DE TENSION EN BORNAS DE CONSUMIDORES, EN REGIMEN PERMANENTE, SERAN LOS SIGUIENTES:

- 6.6kV ± 10%
- 400vca ± 10%
- 230vca ± 10%
- 125vcc +10% -18%
- 230vca ± 2% (C.A. REGULADA)



GENERAL		ELECTRIC		C.T.C.C. TARRAGONA I	
1. 09-08-01		02		INFORMAL Y COMENT.	
EDIC. REDIA		PREP.		REVIS. APROB.	
EDICION PARA		EDICION PARA		EDICION PARA	
CONTIENE INFORMACION PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS, BARRIOS O COMPONENTES		CONTIENE INFORMACION PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS, BARRIOS O COMPONENTES		CONTIENE INFORMACION PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS, BARRIOS O COMPONENTES	
VERIFICACION: N/A		JUBILACION: N/A		VERIFICACION: N/A	
DOCUMENTO REALIZADO EN CAD		DOCUMENTO REALIZADO EN CAD		DOCUMENTO REALIZADO EN CAD	
NO MODIFICAR MANUALMENTE		NO MODIFICAR MANUALMENTE		NO MODIFICAR MANUALMENTE	
EMPRESARIOS AGRUPOADOS		EMPRESARIOS AGRUPOADOS		EMPRESARIOS AGRUPOADOS	
Nº KKS 406-1-BA-EDU-EA-110		DIN A0		ESCALA --	
Nº EA 406-1-DE-11110		HOJA 2		DE 2	

406-1-DE-11110-002-01



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
INGENIERO INDUSTRIAL

*PRESUPUESTO DEL PROYECTO*

---

***Parte III PRESUPUESTO DEL  
PROYECTO***



## Capítulo 1 SISTEMAS DE PROTECCIÓN COMPUESTOS

### **DIGITAL GENERATOR PROTECTION RELAY (DGP), GENERAL ELECTRIC**

Sistema de protecciones modular para generadores de tamaño medio y grande incluyendo a turbinas de combustión de vapor. Proporciona un avanzado sistema de comunicación con puertos Ethernet que reducen los costes de instalación en sistemas de comunicación. Fabricado por General Electric. Se necesitan 2 unidades, una principal y otra de respaldo.

12.484, 57 €/Ud.

X2 Uds.

24.969, 14 €

### **745 TRANSFORMER PROTECTION RELAY, GENERAL ELECTRIC**

El sistema de protección 745 es un relé de protección de generadores con todas las características necesarias. Puede ser utilizado para transformadores de 2 o 3 núcleos. Utiliza múltiples entradas de intensidades y tensiones para dar un servicio de protección primario y de refuerzo a los transformadores, incluyendo protección diferencial, sobrecorrientes de neutro, sobreexcitación, entre otras. Fabricado por General Electric. Se necesitan 4 unidades, 2 para el transformador principal y otras 2 para los transformadores auxiliares.

7.947, 25 €/Ud.

X4 Ud.

31.789, 00 €

### **EX2000e GENERATOR EXCITATION PROTECTION, GENERAL ELECTRIC**

Unidad de control avanzada para los sistemas de excitación de los generadores. Formada por múltiples controladores, un módulo de protecciones, transformadores de potencia y rectificadores de onda. Fabricado por General Electric.

250.000, 00 €/Ud.



X1 Ud.

250.000, 00 €

**NEXUX 1252, SISTEMA DE MEDIDAS**

Unidad de medida de alta precisión especialmente diseñada para controles en transformadores y generadores eléctricos.

565, 00 €/Ud.

X1 Ud.

565, 00 €

**CAPÍTULO C01 SISTEMAS DE PROTECCIÓN COMPUESTOS**  
**(PARCIAL).....307.323, 14 €**



## Capítulo 2 APARAMENTA

**Interruptor magnetotérmico bipolar tipo S282 UCK de ABB**

64.83 €/Ud.

X1 Ud.

64.83 €

**Interruptor magnetotérmico bipolar tipo S282 UCB 6 de ABB**

57.91 €/Ud.

X1 Ud.

57,91 €

**Interruptor magnetotérmico bipolar tipo S202P-K de ABB**

61.21 €/Ud.

X1 Ud.

61,21 €

**Interruptor magnetotérmico bipolar tipo S202P-K1 de ABB**

61.21 €/Ud.

X1 Ud.

61,21 €

**Transformadores de corriente 1500/5A 20VA (x2), 1000/5A 30VA (x1), 6000/5A 50VA (x1), 4500/1,5A 20VA (x1), 15000/1,5A 15VA (x1), 16000/5A 50VA (x11)**

328,15 €/Ud.



X2 Ud.
435,73 €/Ud.
X1 Ud.
468,79 €/Ud.
X1 Ud.
811,37 €/Ud.
X1 Ud.
931,57 €/Ud.
X11 Ud.
12.619,46 €

**CAPÍTULO C02 APARAMENTA**  
(PARCIAL).....**12.864, 62 €**

**TOTAL PRESUPUESTO PROTECCIÓN GENERADOR**  
(TOTAL).....**320.187, 76 €**

El presupuesto total de los aparatos necesarios para proteger el alternador de la central adecuadamente asciende a la cantidad de **trescientos veinte mil ciento ochenta y siete con setenta y seis euros**.